INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Enero 2012 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

BIOLOGÍA
Evolución de los virus gigantes

ASTRONOMÍA
La búsqueda de vida en Marte

MATEMÁTICAS
De la percolación a la física estadística

Agricultura sostenible

Cómo alimentar a la humanidad sin degradar el planeta

AGRICULTURA SOSTENIBLE | MODELOS DE PERCOLACIÓN | VIRUS GIGANTES

N.º 424

ENERO 2012

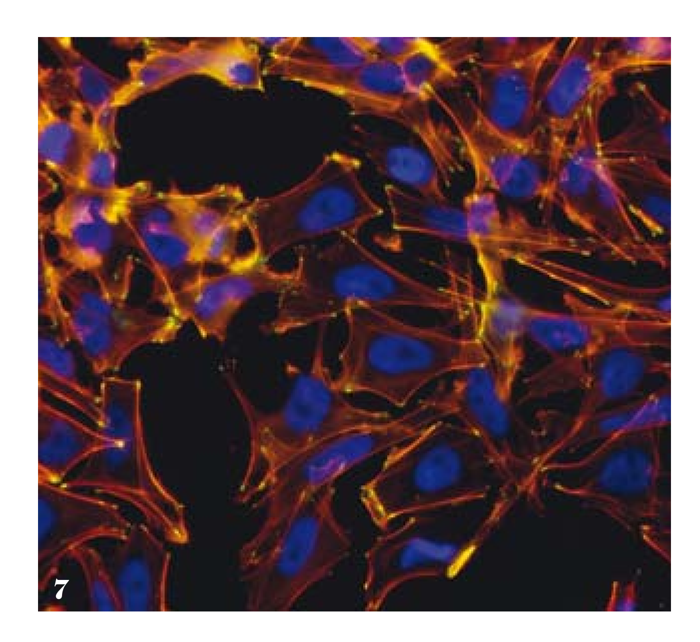


6,00 EUROS

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA
Enero 2012, Número 424


60

DAVID LIITTSCHWAGER



7



44



90

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Satisfacer la demanda mundial de alimentos, al tiempo que se mitigan las agresiones al ambiente, representa uno de los grandes retos al que se enfrenta la humanidad hoy y en los próximos decenios, en los que se prevé un enorme crecimiento de la población. Un plan que incluya la mejora de las prácticas agrícolas y la distribución de alimentos, así como cambios en los hábitos de consumo, permitirían lograr esas importantes metas. Fotografía de Kevin Van Aelst.



redaccion@investigacionyciencia.es



Septiembre 2011

¿DEFECTO O PRIMOR?

En el artículo «La evolución del ojo» [Investigación y Ciencia, septiembre de 2011], Trevor Lamb logra articular, a partir de múltiples indicios, un relato muy convincente sobre la evolución del ojo de los vertebrados. Pero ¿es correcto calificar como «defectos» algunas de las consecuencias de ese desarrollo evolutivo, como el hecho de que los fotorreceptores se encuentren al final de la retina, tras la sombra de vasos sanguíneos y somas celulares? ¿Se ha descartado cualquier posible ventaja de esta disposición?

Donald Robinson
Vancouver, Columbia Británica

Responde Lamb: *Sin duda, debieron darse claros beneficios para que, en el transcurso de la evolución, la vesícula ocular se plegase hacia el interior. Ese proceso acabó situando los fotorreceptores en estrecha vecindad con el epitelio pigmentario de la retina, lo que permite el reciclaje bioquímico de los retinoides tras la absorción de la luz, la atenuación de la luz que atraviesa los fotorreceptores sin ser absorbida, y la entrega de oxígeno y nutrientes desde la coroides. Sin embargo, otras consecuencias de este repliegue no pueden interpretarse sino como «cicatrices» de la evolución.*

NUESTRA IMAGEN DE LOS AGUJEROS NEGROS

En la entrevista de Peter Byrne a Leonard Susskind [«Los límites del conocimiento», Investigación y Ciencia, septiembre de 2011], Leonard Susskind insiste en que la realidad quizá rebase siempre los límites de nuestra capacidad de comprensión. En parte, lo atribuye al principio de complementariedad de los agujeros negros, según el cual existe una ambigüedad inherente en el destino de los objetos que se precipitan en un agujero negro. Desde el punto de vista del objeto, este atraviesa el horizonte y queda destruido al llegar a la singularidad central. Para un observador externo, en cambio, el objeto que cae desaparece en el horizonte de sucesos. Parece claro que esta aparente ambigüedad se debe a que, según la teoría general de la relatividad, el tiempo transcurre de diferente manera para el objeto y para el observador.

En realidad, lo que sucede es que, desde el punto de vista del observador, el objeto se «congela en el tiempo» una vez se halla muy próximo al horizonte de sucesos (y desaparece para siempre de nuestra vista cuando el horizonte se expande). No por ello debemos concluir que el destino del objeto sea ambiguo, sino que el suceso se percibe de una forma u otra según cuál sea del sistema de referencia del observador.

Anthony Tarallo
La Haya, Países Bajos

Responde Susskind: *Tarallo resume la manera en que la teoría de la relatividad clásica interpretaba, con anterioridad a los años setenta, la caída de un cuerpo en un agujero negro. El problema con dicha interpretación se remonta a los hallazgos de Stephen Hawking, quien demostró que, al combinar los efectos de la mecánica cuántica con los de la relatividad general, los agujeros negros emiten radiación y acaban «evaporándose». Tal y como el mismo Hawking subrayó en su momento, si fuese cierto que existen bits de materia que «desaparecen para siempre de nuestra vista», el proceso de evaporación implicaría una contradicción con los principios de la mecánica cuántica. Para resolver el problema, Hawking propuso abandonar dichos principios. Hoy, tras dos decenios de discusiones al respecto, la gran mayoría de los físicos ha llegado a la conclusión de que Hawking se hallaba equivocado. En la actualidad, y por más que resulten contrarios a la intuición, el principio holográfico y el de complementariedad de los agujeros negros constituyen dos pilares esenciales en lo que a nuestra comprensión de la gravedad cuántica se refiere.*

Por supuesto que el suceso se observa de manera diferente según el sistema de referencia del observador. Ese es el motivo por el que dos fenómenos aparentemente contradictorios pueden ocurrir a la vez.

Desearía matizar que la afirmación de que «la realidad quizá rebase siempre los límites de nuestra capacidad de comprensión» constituye una aseveración más rotunda de lo que intentaba transmitir. Mi propósito no era sino puntualizar que la manera en que la evolución ha moldeado nuestro cerebro no se presta a visualizar el extraño comportamiento del mundo cuántico, tan ajeno a nuestra intuición, y mucho menos el de la gravitación cuántica. Pese a todo, los físicos han demostrado una gran habilidad para reestructurar su arquitectura neuronal por medio de la matemática abstracta, un proceso que permite reemplazar nuestras antiguas concepciones del mundo por otras más aptas cuando nos debatimos por entender un fenómeno radicalmente nuevo.



NASA/CXC/M.WEISS

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de sus lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, Pral. 1ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

HISTORIA DE LA TÉCNICA

El precursor de la fotocopia

«Este papel resultará valioso», escribió John Herschel en una memoria científica el 23 de abril de 1842, tras observar el efecto de la luz sobre una muestra que había tratado con «ferrocianato de potasa». Este compuesto se tornaba azul por efecto de la luz, lo que hizo pensar a Herschel que había descubierto el principio de la fotografía en color. No ocurrió así, ni Herschel viviría tampoco lo suficiente como para presenciar la auténtica utilidad de su descubrimiento.

En 1839, Herschel, químico y astrónomo británico, ya había efectuado un hallazgo clave para la impresión salina en blanco y negro (el primer negativo fotográfico) al descubrir una manera de fijar la imagen con tiosulfato de sodio. Su obsesiva búsqueda de otras sustancias fotosensibles le llevó a ensayar con extractos vegetales, orina de perro, y hasta con cierto fármaco, por entonces recién descubierto y hoy denominado ferrocianuro potásico. Este producía imágenes con buen contraste, sobre todo si se combinaba con otro medicamento (citrato de amonio férrico). Además, la imagen era resistente al lavado. Herschel llamó *cianotipo* a su invento, pero este no le satisfizo en absoluto ya a que jamás logró que produjese una imagen positiva estable, sino tan solo negativos. La mayoría de los fotógrafos compartían su opinión, por lo que prescindieron del extraño matiz azulado en favor de las imágenes convencionales en blanco y negro.

El cianotipo no resucitaría hasta un año después del fallecimiento de Herschel. En 1872, la compañía Marion and Company, con sede en París, lo rebautizó como *papel ferroprusiato* y comenzó a comercializarlo para la reproducción de planos arquitectónicos (con anterioridad se copiaba a mano, una técnica costosa y propensa a errores). En la Exposición del Centenario, celebrada en Filadelfia en 1876, el proceso llegó a las costas estadounidenses, donde finalmente triunfó con el nombre de *blueprint* («impresión azul») como el primer procedimiento económico de duplicación de documentos. Todo cuanto se requería era un dibujo sobre papel translúcido. Este se ponía en contacto con una segunda hoja recubierta con el compuesto de Herschel, situada bajo un cristal plano y expuesta a luz solar. Al final, la copia se lavaba con agua. El cianotipo reproducía el original en negativo: con líneas blancas sobre un fondo azul.

Los talleres de cianotipia prosperaron durante casi un siglo, instalados en lo alto de edificios bien iluminados por el sol. Entre los años cincuenta y sesenta del siglo pasado fueron cediendo el paso a procesos que requerían menos trabajo, como la diazocopia y la fotocopia. Hoy, cuando casi todos los planos arquitectónicos se obtienen por medios digitales, Herschel se habría maravillado ante la gama de colores de una impresora láser moderna. Y también se habría quedado perplejo al comprobar que, a pesar de sus intentos fallidos por fotografiar en color, los hablantes de lengua inglesa continúan llamando *blueprint* a cualquier proyecto innovador... y lo presentan sobre un fondo azul.

—Jonathon Keats

DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

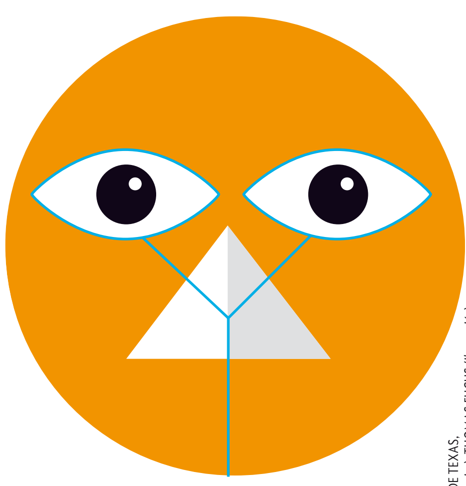
Imágenes en 3D sin gafas

La televisión en tres dimensiones saltó a la fama hace unos dos años. Sin embargo, la técnica adolece de una limitación importante: requiere emplear gafas especiales. Según los expertos en mercadotecnia, el visionado en 3D no se popularizará hasta que los espectadores puedan disfrutarlo con el ojo desnudo.

Aunque la técnica de 3D sin gafas ya existe para teléfonos inteligentes y algunas consolas de videojuegos portátiles, dichos artilugios utilizan pantallas de cristal líquido (LCD), las cuales agotan las baterías con rapidez y limitan la miniaturización de los dispositivos. Por ello, los expertos investigan ahora las posibilidades de los diodos emisores de luz (LED). Debido a que los LED se basan en compuestos orgánicos que brillan en respuesta a señales eléctricas, los dispositivos resultan más finos, ligeros y flexibles que las pantallas LCD. La técnica fue descrita en detalle en un artículo publicado el pasado mes de agosto en la revista *Nature Communications*.

Los investigadores, procedentes de la Universidad Nacional de Seúl, Act Company y Minuta Technology, colocaron una matriz de prismas microscópicos en la pantalla para crear un filtro que guiase la luz en una u otra dirección. El dispositivo, que los expertos bautizaron como *prisma Lucius* (del latín para «brillante y luminoso»), hacía aparecer un objeto que solo podía verse desde cierto ángulo. Al manipular la intensidad de la luz, resultaba posible generar dos imágenes, una para el ojo izquierdo y otra para el derecho. Dicha combinación produce una sensación de profundidad que el cerebro interpreta como tridimensional.

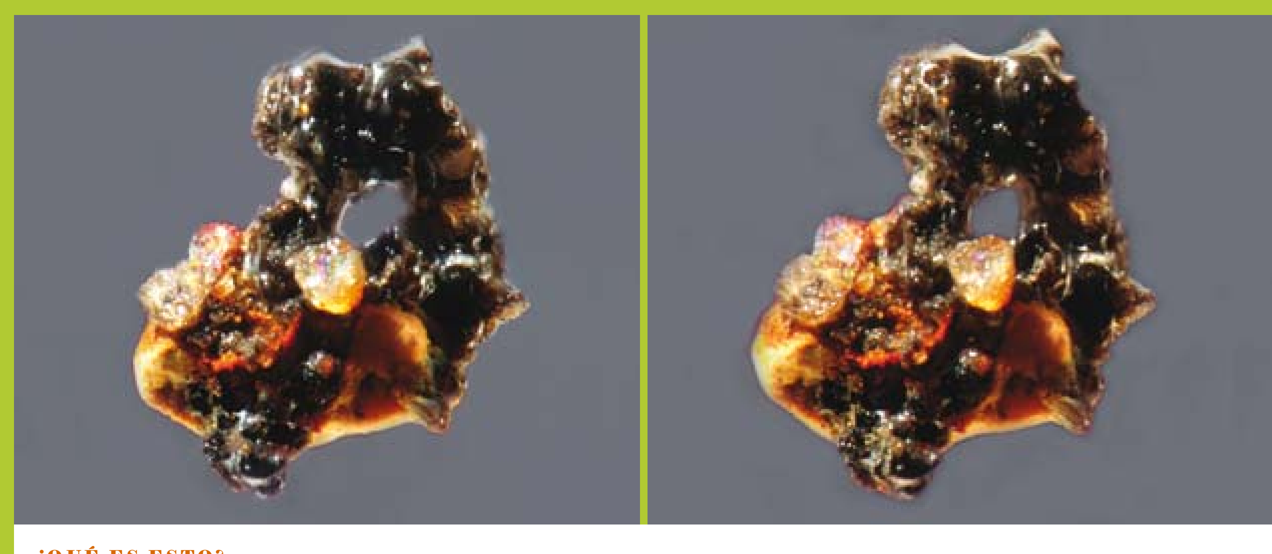
Existen otras técnicas que recrean imágenes en tres dimensiones sin necesidad de gafas. Los teléfonos inteligentes HTC EVO 3D y LG Optimus poseen pan-



tallas con rendijas de precisión que permiten que cada ojo vea un conjunto distinto de píxeles. Sin embargo, exigen que el espectador mire hacia la pantalla desde un ángulo determinado; un inconveniente que la nueva técnica quizá sea capaz de resolver.

—Larry Greenemeier

CORTESÍA DEL CENTRO DE ESTUDIOS DEL ESTE DE TEXAS, UNIVERSIDAD ESTATAL STEPHEN F. AUSTIN (*blueprint*), THOMAS FUCHS (*ilustración*)



¿QUÉ ES ESTO?

Arena lunar: Algunos investigadores están utilizando los avances más recientes en el campo de la microscopía para examinar de nuevo las muestras lunares que trajo consigo el *Apolo 11*. Gary Greenberg, del Instituto de Astronomía de la Universidad de Hawái, tomó esta imagen estereográfica (*bizquee ligeramente hasta que observe tres imágenes y, después, fije la vista en el centro*) de un grano de arena lunar, aumentado aquí unas 300 veces. La imagen revela el pequeño ojo de buey provocado por un micrometeorito que chocó contra el grano de arena. El impacto hizo que esa zona se derritiera y, al enfriarse con gran rapidez, se creó una estructura de vidrio. Greenberg y sus colaboradores esperan que otros estudios de esta clase permitan profundizar en los detalles de la evolución de nuestro satélite. —*Ann Chin*

CÉLULAS MADRE

¿Embrión o partenote?

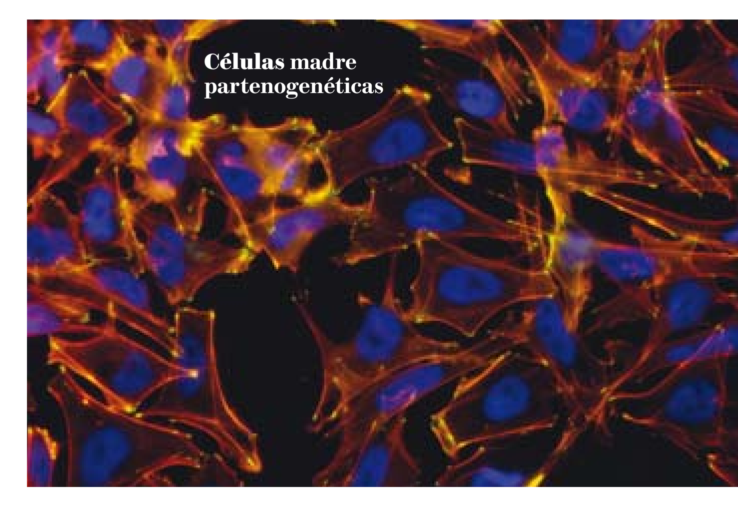
Muchos investigadores estadounidenses suspiraron de alivio el pasado mes de julio, cuando una resolución judicial aprobó la legalidad de ciertas prácticas con células madre embrionarias. El fallo dictaminaba que los trabajos sobre líneas celulares embrionarias ya existentes y que hubiesen sido derivadas en laboratorios privados no violaban la prohibición de financiar con fondos públicos la destrucción de embriones. Con todo, muchos continúan frustrados al ver cómo un nuevo método para obtener células madre sigue privado de canales de financiación.

Hasta hace poco, crear células madre embrionarias humanas requería comenzar con un óvulo fecundado. En 2007, sin embargo, la compañía International Stem Cell anunció que podía obtener líneas celulares a partir de óvulos sin fecundar. El logro fue posible gracias a la partenogénesis, una técnica que induce la división del óvulo mediante el empleo de sustancias químicas. Aunque, durante las primeras etapas del desarrollo, el conjunto evoluciona tal y como lo haría un embrión, el óvulo —en estos casos denominado partenote— carece de material genético paterno, por lo que jamás podrá convertirse en un feto.

Al igual que las células madre embrionarias, las células madre partenogenéticas pueden convertirse en distintas clases de tejidos, los cuales pueden luego trasplantarse a zonas dañadas del cuerpo. Por el momento, International Stem Cell ha conseguido derivar células hepáticas; ahora, investigan la obtención de neuronas para tratar la enfermedad de Parkinson y la de células pancreáticas para la diabetes. Mientras tanto, la Fundación Bedford para la Investigación con Células Madre intenta mejorar la eficiencia de la obtención de células madre a partir de partenotes.

Alan Trounson, presidente del Instituto de Medicina Regenerativa de California, afirma que todavía está por ver si los óvulos sin fecundar producirán tejidos estables. «Es necesario que otros laboratorios lo logren», señala. Pero dicha tarea no se antoja fácil. La línea de investigación se enfrenta a las directrices de los Institutos Nacionales de la Salud y las leyes federales, para quienes los partenotes son embriones, por lo que derivar nuevas líneas celulares partenogenéticas queda prohibido para todos los laboratorios que reciban financiación pública; es decir, la gran mayoría de ellos. Si la situación no cambia, en EE.UU. habrán de ser los pocos centros privados quienes realicen avances en este nuevo campo.

—*Julia Galef*



Células madre partenogenéticas

CORTESÍA DE GARY GREENBERG (*arena lunar*); DE: «DERIVATION OF HIGH-PURITY DEFINITIVE ENDODERM FROM HUMAN PARTHENOGENETIC STEM CELLS USING AN IN VITRO ANALOG OF THE PRIMITIVE STREAK», POR NIKOLAY TUROVETS ET AL. EN *CELL TRANSPLANTATION*, VOL. 20, N.º 6, JUNIO DE 2011 (*células madre*)



MEDICINA

Redes sociales de médicos y pacientes

A pesar de los adelantos médicos, el tratamiento de muchas enfermedades crónicas sigue siendo bastante aleatorio e incoherente. Por ejemplo, los jóvenes con la enfermedad de Crohn, un doloroso trastorno digestivo que suele diagnosticarse en la adolescencia, a veces reciben información contradictoria sobre medicamentos, modificaciones de la dieta y terapias alternativas. Para ayudar a mejorar la atención de estos pacientes, un equipo de pediatras y expertos en informática está desarrollando un nuevo tipo de red social que convierte a médicos y pacientes en colaboradores de estudios científicos.

Así es como funciona: con cada modificación del tratamiento, el médico y el paciente participan en un miniensayo clínico. El enfermo anota sus síntomas en informes diarios, que comunica mediante mensajes de texto o a través de Internet. El médico utiliza esa información para tomar decisiones inmediatas. ¿Debería cambiarse la dosis del medicamento? ¿Ayuda la nueva dieta a aliviar los síntomas? Después, los resultados de los experimentos individuales se introducen en un banco de datos en la Red, donde se unen a los de otros pacientes que participan en experimentos similares, con lo que se consigue una mayor comprensión de la dolencia en cuestión. En los primeros ensayos de este proceso, los médicos lograron aumentar la remisión de la enfermedad entre un 55 y un 78 por ciento, sin necesidad de añadir ningún medicamento nuevo a su arsenal. «La idea consiste en realizar una atención continuada y recopilar datos en tiempo real, lo que nos ayuda a mejorar el conocimiento y tratamiento de la dolencia», afirma Peter Margolis, del Centro Médico del Hospital Infantil de Cincinnati y cofundador del nuevo portal, la Red de Colaboración de Cuidados Crónicos (*Collaborative Chronic Care Network*, o *C3N*).

El lanzamiento de C3N tuvo lugar en 2011, en unas 30 instituciones de Estados Unidos. Por ahora, se centra en la enfermedad de Crohn en niños, pero podría ampliarse para incluir otras dolencias, como la diabetes, enfermedades cardíacas, psoriasis y algunos tipos de cáncer. Los fundadores consideran que C3N supondrá también una nueva plataforma para la investigación clínica, menos centrada en los beneficios que las habituales. «Debido al alto coste de los ensayos clínicos a gran escala, solo suelen estudiarse los tratamientos que puedan proporcionar un alto rendimiento económico», afirma Ian Eslick, doctorando del Laboratorio Multimedia del Instituto Tecnológico de Massachusetts y principal arquitecto de la web de C3N. «A través de C3N, podemos realizar análisis científicos sobre otras estrategias que las personas prueban en sus casas y parecen prometedoras, como los probióticos, las dietas sin gluten o modificaciones en la ingesta de hierro, aunque no vayan a ser rentables».

—Jeneen Interlandi

FISIOLOGÍA

Atletas del cielo

Los alpinistas que se esfuerzan por subir los últimos metros de la cumbre del monte Makalu, en el Himalaya, se asombran a menudo al ver a los ánsares indios volando sobre ellos hacia la India, donde pasan el invierno. Atraviesan el cielo a una altura de 8300 metros, casi tan alto como los aviones comerciales.

Durante años, se creía que los fuertes vientos de cola y las corrientes ascendentes ayudaban a los ánsares en su travesía. El equipo de Charles Bishop, de la Universidad de Bangor, en el norte de Gales, comprobó esta teoría mediante el seguimiento de los movimientos de más de una docena de ejemplares. Para establecer su situación, velocidad y altitud, las aves llevaban pequeños paquetes que contenían transmisores vía satélite.

Para su sorpresa, se descubrió que, en lugar de volar a primera hora de la tarde, cuando el calor del terreno crea corrientes que ascienden a veinte kilómetros por hora, los ánsares volaban por la noche o a primera hora de la mañana, cuando de hecho se forma una ligera corriente descendente. En un artículo recién publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, el equipo sugiere que el hecho de que el aire sea más frío y denso a esas horas favorece el empuje ascensional de los ánsares. El aire más frío también los ayuda a regular el calor corporal y, además, contiene más oxígeno, lo que les permite volar en el aire enrarecido de las alturas.

El grupo de Bishop se asombró al descubrir que los ánsares cruzaban el Himalaya en un solo día y ascendían unos 6000 metros en siete u ocho horas. Para volar esa distancia a tanta altura, la especie necesita un consumo de oxígeno entre diez y veinte veces mayor de lo normal. En comparación, las aves que vuelan a altitudes inferiores, como el ganso del Canadá, no pueden mantener niveles de metabolismo en reposo a nueve kilómetros de altura. Unas alas más grandes, una mayor capacidad pulmonar, una densa red de capilares alrededor de los músculos del vuelo y una hemoglobina que retiene con mayor fuerza el oxígeno en los pulmones contribuyen al flujo de oxígeno a través del sistema circulatorio de los ánsares indios y, en concreto, hacia los músculos del vuelo. Comprender mejor por qué los tejidos de esas aves resultan tan eficientes en la absorción de oxígeno podría ayudarnos a explicar la respiración humana.

—David Godkin



INTERPRETACIÓN DE DATOS

Cuanto mayor es el plato, más comida... ¿o al revés?

Un estudio reciente realizado por la Universidad de Utah sugería que la cantidad de comida consumida en un restaurante dependía del tamaño de los tenedores. Investigaciones como esta nos recuerdan que, en ocasiones, resulta posible extraer conclusiones opuestas a partir de un mismo conjunto de datos. Por desgracia, tales contradicciones no representan ni mucho menos casos aislados. Cuando se trabaja con datos débilmente correlacionados, a menudo pueden inferirse tendencias falaces sin más que redefinir algunas de las categorías empleadas para clasificar los datos. La práctica no es ajena a algunos estudios sobre criminalidad, donde se ha empleado para «demostrar» que ciertas clases de delitos evolucionaban de acuerdo con las pautas deseadas.



RYAN McVAY, GETTY IMAGES (*tenedor*); AMERICAN DOCUMENTARY FILMS (*The City*)

Consideremos un ejemplo sencillo, inspirado en el estudio sobre los tenedores. Supongamos que en un bufé almuerzan diez comensales. Nuestro objetivo consistirá en determinar la influencia del tamaño de los platos en la cantidad de comida que se sirve cada uno.

Tres personas recibieron platos de menos de 20 centímetros de diámetro, clasificados como «pequeños». Estas dieron cuenta de 270, 300 y 330 gramos de comida; es decir, una media de 300 gramos. Los cuatro invitados a quienes se les asignaron platos «medianos», de entre 20 y 28 centímetros, consumieron 540, 210, 450 y 120 gramos de comida, lo que supone una media de 330 gramos. Por último, los tres comensales que tomaron platos de más de 28 centímetros de diámetro, considerados «grandes», se sirvieron 390, 330 y 360 gramos: unos 360 gramos de media. ¿Ve la tendencia? Al dar a los comensales platos cada vez mayores, aumenta el tamaño medio del almuerzo. ¡Un resultado estupendo!

Sin embargo, ¿qué habría pasado si hubiésemos decidido que los platos medianos eran aquellos de entre 21 y 27 centímetros, con las correspondientes redefiniciones de los platos pequeños y grandes? Supongamos, además, que el comensal que tomó 540 gramos de comida lo hizo en un plato de 20,5 centímetros. Antes, ese plato era considerado mediano, pero ahora pertenece a la categoría de los pequeños. E imaginemos también que el invitado que se limitó a un parco almuerzo de 120 gramos lo degustó en un plato de 27,5 centímetros, ahora clasificado como grande.

Haga usted mismo los cálculos. A tenor de las nuevas definiciones, quienes ahora almorzaron en platos pequeños, medianos y grandes consumieron, respectivamente, 360, 330 y 300 gramos. ¿Ve la tendencia? A medida que aumenta el tamaño del plato, disminuye la cantidad de comida. ¡Un resultado estupendo!

El problema no reside en el pequeño tamaño de la muestra. Un gran número de datos puede incluso facilitar esta clase de prestidigitaciones, ya que ofrece más oportunidades para jugar con las categorías. ¿Alguien se anima a hacer lo mismo con la intensidad de las manchas solares o con los resultados de la liga de fútbol?

—John Allen Paulos

AGENDA

CONFERENCIAS

11 de enero - Ciclo
Paleogenómica neandertal; posibilidades y futuro
Carles Lalueza-Fox, Instituto de Biología Evolutiva CSIC-UPF
Museo de la Evolución Humana
Burgos
www.museoevolucionhumana.com

18 de enero – Ciclo sobre demografía
Inmigración y clase social en España
Miguel Requena, UNED
Centro de Ciencias Humanas y Sociales, CSIC
Madrid
www.cchs.csic.es/es/node/277623

EXPOSICIONES

Energía. Por un futuro sostenible
Cosmocaixa
Madrid
www.obrasocial.lacaixa.es

A través del espejo. Lecturas de la obesidad: medicina, arte y sociedad
Instituto de Historia de la Medicina y de la Ciencia López Piñero
Valencia
www.ihmc.uv-csic.es

OTROS

11 de enero – Taller matemático
¡Echen un vistazo a estas partituras!
Ana María Pereira,
Universidad de Minho (Braga)
Universidad de Cantabria
www.unican.es/Aulas/ciencia

12 de enero – Ciclo «Cine y ciencia»
Luces y sombras de la tecnología: las tecnocracias de los años 30 a la luz del documental *The City* de Lewis Mumford
Proyección de la película *The City* (1939)
Presenta Jaume Sastre, CEHIC
Instituto de Estudios Catalanes
Barcelona
blocs.iec.cat/arban/category/cine



11, 18 y 25 de enero – Curso para profesores
Las nuevas «Bio», del laboratorio al aula
Centro de Regulación Genómica
Barcelona
www.crg.eu/formacio

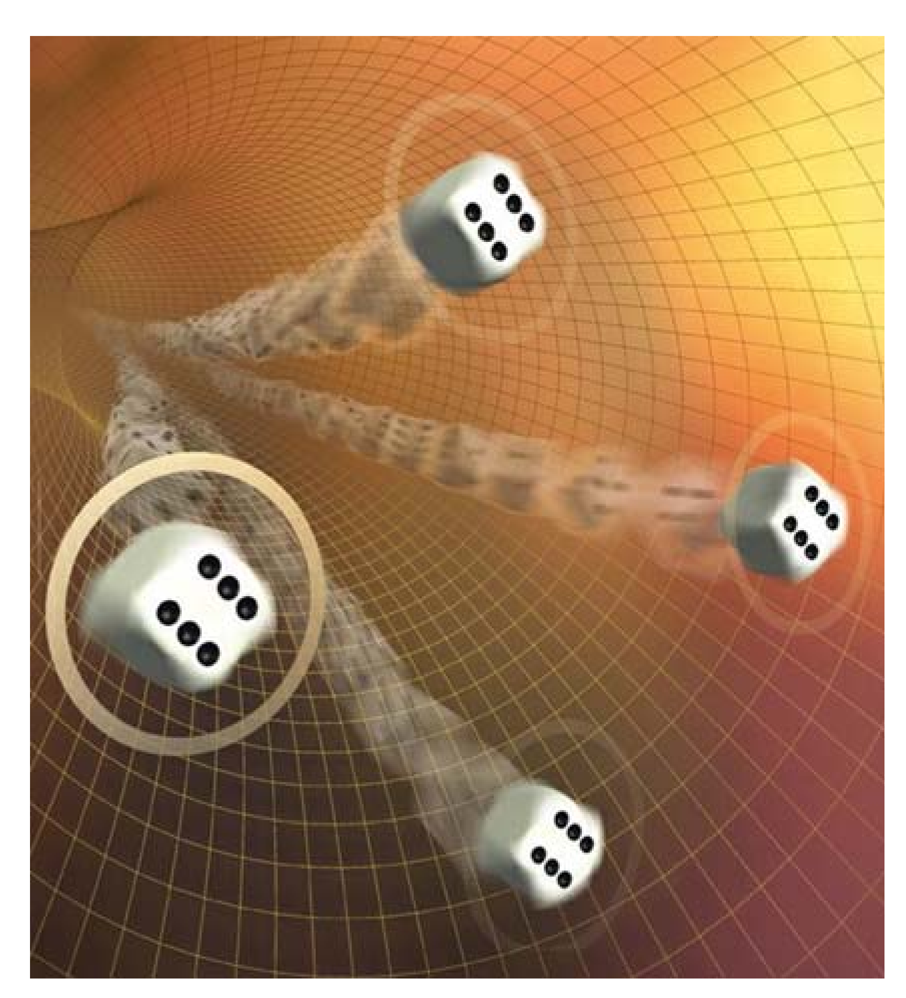
MECÁNICA CUÁNTICA

La certeza del azar cuántico

Por vez primera se logra distinguir entre la aleatoriedad intrínseca a un proceso cuántico y el azar ficticio debido al ruido experimental. La clave: el comportamiento no local de las partículas entrelazadas

Nos encontramos en la final del Mundial de Fútbol de 2010. Antes de que comience el partido, el árbitro lanza una moneda al aire para determinar qué portería defenderá cada equipo. Los capitanes de España y Holanda saben que la probabilidad de obtener cara o cruz es la misma: en otras palabras, que la aleatoriedad del resultado garantiza la justicia del sorteo. Pero ¿estamos seguros de que se trata de un proceso realmente aleatorio?

El azar constituye un concepto fascinante que ha atraído el interés de comunidades muy diversas, desde físicos y matemáticos hasta filósofos. No obstante, en nuestro mundo macroscópico, gobernado por la física newtoniana, el azar no existe en sentido estricto. Dado un sistema de partículas, un observador que disponga de un conocimiento perfecto de sus posiciones, velocidades e interacciones podrá predecir de manera determinista el estado del sistema en todo momento futuro —y pasado—. Todo azar es aparente; en realidad, no supone más que un reflejo de nuestra ignorancia o de nuestra falta de control sobre las variables del sistema.



Las partículas cuánticas entrelazadas exhiben una conexión no local que se manifiesta aunque se encuentren separadas grandes distancias. La física cuántica garantiza que los resultados de las medidas sobre las partículas han de ser realmente aleatorios, ya que, en caso contrario, sería posible enviar información de manera instantánea.

CORTESÍA DE LA FACULTAD DE FÍSICA DE LA UNIVERSIDAD DE VIENA Y ARKITEK

A escala microscópica, sin embargo, nuestro mundo no se halla gobernado por la física de Newton, sino por la física cuántica, una teoría que desafía nuestro sentido común. Según esta existen pares de partículas, denominadas partículas entrelazadas, que se comportan como un objeto único e indivisible aun cuando cada una de ellas se encuentre separada de su compañera por una distancia enorme. El fenómeno, conocido como no-localidad cuántica, fue puesto de manifiesto por John Bell en 1964. Bell dedujo un criterio —la violación de ciertas desigualdades matemáticas— que permitía demostrar el carácter no local de los sistemas cuánticos. La violación de las desigualdades de Bell fue observada experimentalmente por Alain Aspect y sus colaboradores en 1982 [*véase* «La realidad de los cuantos», por Anton Zeilinger; Investigación y Ciencia, junio de 2009].

¿Puede esa conexión no local entre partículas entrelazadas utilizarse para enviar mensajes de manera instantánea entre dos sitios lejanos? La respuesta sería afirmativa si fuese posible controlar el comportamiento de cada partícula. La física cuántica, sin embargo, predice que los resultados de las medidas experimentales son *genuinamente* aleatorios. Por tanto, la no-localidad cuántica implica la existencia de una nueva forma de azar en el mundo microscópico: sin él, sería posible enviar información de manera instantánea, lo que contradiría el principio de causalidad relativista, uno de los pilares de la física moderna.

Azar verdadero

Vayamos ahora un poquito más allá en el estudio de la relación entre no-localidad y azar, y preguntémonos: ¿cuánto azar cuántico se genera en un experimento de no-localidad? ¿Es posible estimarlo y separarlo del azar «ficticio», aquel de naturaleza clásica que solo se debe al ruido y a la falta de control sobre el sistema?

Además de su importancia desde un punto de vista fundamental, tales cuestiones revisten gran interés práctico, ya que el azar supone un recurso con aplicaciones en múltiples y muy diversas áreas, desde

la criptografía hasta la simulación de sistemas de física y biología. Por ello, hoy en día se dedican grandes esfuerzos a lograr dos objetivos: por un lado, desarrollar buenos generadores de números aleatorios; por otro, diseñar controles fiables que permitan certificar la naturaleza aleatoria de los números generados por tales dispositivos. Si bien se han concebido distintas propuestas para la generación de números aleatorios —tanto clásicas como cuánticas—, todas ellas adolecen de tres problemas fundamentales.

El primero de ellos es el relativo a la *certificación*: como criterio de la calidad de la aleatoriedad de las secuencias generadas suelen emplearse una serie de controles estadísticos diseñados para detectar patrones en dichas secuencias. Pero, si bien la ausencia de pautas es deseable, no queda claro qué significa que una secuencia supere dichas pruebas. En el caso de los generadores cuánticos existentes hoy en día, el problema de la certificación se antoja aún más crítico, pues resulta contradictorio certificar la presencia de un azar de origen cuántico a partir de controles que son satisfechos por generadores clásicos.

El segundo problema reside en la *privacidad*: numerosas aplicaciones relacionadas con la generación de secuencias aleatorias, en especial aquellas destinadas a criptografía, requieren que los números resulten difíciles de predecir no solo por el experimentador, sino también por cualquier observador externo (por ejemplo, un adversario que intente descifrar la información que haya sido codificada a partir de esos números).

Por último, se requiere la *independencia con respecto al dispositivo*: en todos los generadores existentes, las propiedades de las secuencias aleatorias dependen en gran medida de los detalles del dispositivo experimental. Se trata de algo que debería evitarse, a fin de lograr una generación más robusta frente a las imperfecciones.

En un trabajo reciente introdujimos una serie de técnicas que, por vez primera, lograban medir el azar cuántico generado en un experimento de no-localidad. Además, nuestros resultados permitieron diseñar un nuevo tipo de generadores cuánticos de números aleatorios que satisfacen todos los requisitos anteriores: la aleatoriedad queda certificada por la violación de las desigualdades de Bell, lo que garantiza la privacidad e independencia con respecto al dispositivo de las secuencias generadas.

En colaboración con el grupo de Chris Monroe, de la Universidad de Maryland, llevamos a cabo una prueba experimental de dichos resultados teóricos, cuyos resultados se publicaron en *Nature* en abril de 2010. El montaje constaba de dos trampas separadas un metro. En cada una de ellas se atrapaba un ion y, a través de pulsos de luz que se enviaban a cada uno, se efectuaba un experimento de violación de las desigualdades de Bell.

Dicha violación y nuestras técnicas teóricas nos permitieron certificar la generación de 42 bits aleatorios intrínsecamente cuánticos. Por supuesto, la tasa de generación es ridícula: para generar esos 42 bits, fue necesario tomar datos durante semanas. No obstante, el experimento demostró la posibilidad de generar números genuinamente aleatorios sin necesidad de efectuar ninguna suposición acerca del funcionamiento de los dispositivos.

Nuestros resultados abren nuevas perspectivas para el estudio del azar, tanto desde un punto de vista fundamental como aplicado. En particular, demuestran que el azar puede ser certificado, un objetivo difícil —si no imposible— con herramientas de la teoría de la información clásica. La clave radica en que, al contrario de lo que se ha venido realizando hasta el momento, la certificación no se efectúa a partir de técnicas matemáticas, sino a través de las leyes de la física cuántica.

—Antonio Acín
ICREA
Instituto de Ciencias Fotónicas, Castelldefels
Serge Massar y Stefano Pironio
Laboratorio de Información Cuántica
Universidad Libre de Bruselas

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

El problema de la fiesta de cóctel

Puede que en breve los ordenadores consigan descifrar las voces de varias personas que hablan al mismo tiempo

Imagine que se encuentra en una fiesta multitudinaria y que Álex le está contando una historia soporífera. Al mismo tiempo, oye cómo Daniel le refiere a Gloria un chismorreo que a usted le interesa mucho más, por lo que decide ignorar a Álex y concentrarse en el relato de Daniel. ¡Enhorabuena! Acaba de demostrar la capacidad humana para resolver el *problema de la fiesta de cóctel*: cómo separar un discurso de entre varios que tienen lugar al mismo tiempo.

Hoy en día los ordenadores carecen de tal facultad. Aunque el reconocimiento informático del habla constituye una técnica cada vez más asentada, todavía falla cuando dos personas hablan a la vez. Lograr que un ordenador distinga entre varias voces no solo mejoraría los sistemas de reconocimiento del habla, sino que supondría un gran avance en otros campos en los que también es necesario separar señales, como la interpretación de los escáneres cerebrales, por ejemplo.

El problema reviste una dificultad enorme. Distinguir entre dos flujos verbales plantea un reto mucho mayor que comprender el habla de una sola persona, pues siempre existe una cantidad astronómica de combinaciones de voces que pueden engendrar un mismo sonido. Analizar todas esas posibilidades mediante un método de fuerza bruta resulta inviable. Para resolver con eficiencia el problema de la fiesta de cóctel, debe existir algún atajo que explote los rasgos característicos de la voz y el habla.

Tanto si solo habla una persona como si lo hacen varias, el sonido resultante se compone de un espectro de frecuencias. La intensidad de cada una de ellas varía en escalas de tiempo del orden del milisegundo, modulaciones que pueden registrarse en un espectrograma. Las técnicas habituales de reconocimiento del habla analizan los datos fonema a fonema. Cada uno de los fonemas que se pronuncian

Frecuencia A
Frecuencia B
Frecuencia C
Tiempo

Huellas acústicas: Los espectrogramas representan las variaciones temporales del sonido en una gama de frecuencias. Los que mostramos aquí reproducen dos segundos de una conversación. La escala de colores indica un volumen alto (*rojo*) o bajo (*azul*). Cuando cuatro personas hablan a la vez (*A*), el flujo sonoro de uno de los hablantes (*B*) resulta difícil de desentrañar. Un nuevo algoritmo de separación logró distinguir el habla de esa persona (*C*) con una precisión suficiente como para que un ordenador reconociera lo que decía.

genera un patrón variable, aunque reconocible, en el espectrograma.

Los modelos estadísticos desempeñan un papel fundamental en todo sistema de reconocimiento del habla, ya que sirven para especificar la probabilidad de que a un sonido como /o/ le siga otro como /n/. El algoritmo de reconocimiento busca las secuencias de fonemas más probables e intenta construir con ellas palabras enteras y locuciones plausibles.

Sin embargo, cuando dos personas hablan a la vez, el número de posibilidades se dispara. En cada momento, el espectro de frecuencias podría provenir de dos fonemas cualesquiera, cada uno de ellos articulado en cualquiera de las maneras en que una persona puede emplearlo en una palabra. La dificultad crece exponencialmente con cada hablante que se suma a la conversación.

Ideas prometedoras

Por fortuna, los sonidos en el habla tienden a «dispersarse»: el espectrograma de dos personas que hablan a la vez suele presentar numerosas zonas pequeñas en las que uno de los interlocutores habla mucho más alto que el otro. Es de prever que, en tales regiones, las técnicas ordinarias de reconocimiento del habla logren identificar fonemas característicos en la voz predominante, lo cual ayudaría a desenredar los discursos. Explotar este tipo de características ha permitido hallar atajos en la intrincada combinatoria que requiere la separación automática de conversaciones. Al respecto, existen hoy en día dos líneas principales de investigación.

La primera de ellas intenta extraer un patrón genérico a partir de los detalles particulares. Para ello, se examinan las características básicas de un espectrograma a fin de aislar las regiones que proceden de un mismo hablante. Por ejemplo, dos frecuencias diferentes que comienzan justo en el mismo instante probablemente hayan sido emitidas por una sola persona.



A menudo también se buscan zonas del espectrograma en las que no predomina ninguno de los hablantes. Los algoritmos apartan entonces esas zonas «corruptas» e intentan encontrar secuencias de fonemas que se ajusten a las zonas «limpias». Un grupo de la Universidad de Sheffield obtuvo buenos resultados gracias a esta técnica: en un informe publicado en 2010 que comparaba la eficacia de diez algoritmos, el equipo de Sheffield quedó en tercera posición.

La mayoría de los investigadores, sin embargo, se decanta por el enfoque opuesto: se buscan secuencias de fonemas plausibles de manera individual y cuya combinación produzca el sonido resultante. Desde luego, considerar todas las combinaciones resulta prohibitivo; el truco consiste en simplificar o aproximar el proceso sin sacrificar en demasía la precisión.

Tuomas Virtanen, de la Universidad de Tecnología de Tampere, abrevió la búsqueda al concentrarse alternativamente en cada uno de los dos hablantes: en esencia, dada la mejor estimación del discurso del hablante *A*, se busca el discurso de *B* que mejor reproduce el conjunto; después, el proceso se repite intercambiando los papeles de uno y otro. El algoritmo de Tampere superó al del grupo de Sheffield y obtuvo la segunda mejor marca en el mismo informe, si bien aún se situaba un diez por ciento por debajo de los oyentes humanos.

El primer sistema de separación automática del habla que ha logrado superar a los humanos ha sido diseñado por un grupo del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM. Su último algoritmo ha mostrado ser eficaz incluso con cuatro voces superpuestas. Por un lado, realiza el análisis habitual en el que se evalúan secuencias tentativas de fonemas para cada uno de los hablantes. Después, al iterar el proceso, el programa emplea las mejores estimaciones del discurso para buscar las regiones del espectrograma en las que una persona habla tan alto que enmascara las voces del resto. Resulta interesante mencionar que atender a este efecto de máscara permite refinar de manera simultánea la estimación de todas las voces.

Aún queda un largo camino por recorrer hasta que la separación automatizada del habla permita escuchas furtivas en ambientes ruidosos. Sin embargo, los resultados recientes sugieren que el objetivo se logrará antes o después.

—*Graham P. Collins*

BRYAN CHRISTIE (*ilustración*); FUENTE: «SINGLE-CHANNEL MULTITALKER SPEED RECOGNITION», POR S. J. RENNIE ET AL. EN *SIGNAL PROCESSING MAGAZINE, IEEE*, VOL. 27, N.º 6, NOVIEMBRE DE 2010

ENFERMEDADES INFECCIOSAS

El dengue en Latinoamérica

En las últimas décadas, esta enfermedad potencialmente mortal transmitida por mosquitos se ha convertido en un grave problema de salud que amenaza a más del cuarenta por ciento de la población mundial

El dengue, una enfermedad humana causada por un virus transmitido por mosquitos, aflige de 50 a 100 millones de personas y causa cerca de 25.000 muertes anualmente, sobre todo en regiones tropicales y subtropicales del planeta. En América, el principal vector es el mosquito de la fiebre amarilla: *Aedes aegypti*. Los síntomas incluyen fiebre, cefalea, fuertes dolores articulares y musculares, náuseas, vómitos y sarpullidos. La enfermedad puede complicarse y derivar en dengue hemorrágico (DH), una variante potencialmente mortal que se caracteriza por fiebre alta, daños a los vasos sanguíneos y linfáticos, sangrado por la nariz, encías y bajo la piel, inflamación del hígado y fallo circulatorio; estos síntomas pueden empeorar y causar hemorragias masivas, shock y muerte.

Existen cuatro serotipos del virus del dengue. La coinfección o la sucesión de infecciones causadas por diferentes serotipos aumentan la probabilidad de desarrollar dengue hemorrágico. La enfermedad no se cura. Solo se tratan los síntomas, mediante consumo de líquidos, transfusión de plaquetas y cuidados paliativos del dolor.

Brotes y epidemias

Se desconoce todavía el origen de la enfermedad. Algunas investigaciones apuntan a regiones de África e Indochina; otros indicios señalan la región tropical de Asia. Se produjeron brotes de enfermedades con síntomas similares en China en los años 265-240 d.C., pero el primer brote de dengue —bien documentado— ocurrió en Filadelfia en 1780. Durante los siglos XVIII, XIX y principios del XX, grandes epidemias de enfermedades parecidas al dengue azotaron América continental y las islas del Caribe. La primera epidemia confirmada mediante pruebas de laboratorio tuvo lugar en la cuenca del Caribe y en Venezuela entre 1963 y 1964. Entre 1968 y 1969 se produjo otra epidemia en la misma región.

Durante los años cincuenta y sesenta, la Organización Panamericana de la Salud (OPS) emprendió una campaña para el exterminio del mosquito *Aedes aegypti* con el propósito de eliminar la fiebre amarilla y el dengue. Se logró que el dengue disminuyera en la región durante la década de los setenta, si bien ocurrieron varios brotes en el Caribe y Centroamérica.

La campaña contra el mosquito fue abandonada de forma gradual, con lo que *Aedes aegypti* volvió a infestar la región. La primera gran epidemia ocurrió en Cuba en 1981: se registraron 344.000 casos de dengue, 10.312 casos de dengue hemorrágico y 158 muertes. Otras epidemias devastadoras fueron las de Brasil (1986-1987), Venezuela (1989-1990) y Perú (1990), entre otras. Desde entonces, se han detectado graves aumentos en la incidencia de la enfermedad en la mayoría de los países latinoamericanos. Cada año se registran numerosos casos de DH en Sudamérica, Centroamérica y en el Caribe.

Además del restablecimiento del mosquito vector, se han identificado otras causas del aumento del dengue y del DH en la región: aumento de la población, concentración de la misma en megaciudades, urbanización no planificada, aumento de los viajes —sobre todo por vía aérea— y otros movimientos poblacionales, instalaciones sanitarias pobres y deterioro de la infraestructura de salud pública.

Transmisión

En su ámbito nativo en Asia y África tropical, el dengue corresponde a una zoonosis que circula entre primates arbóreos y mosquitos que viven en el bosque. En cambio, no hay datos de un ciclo selvático similar en el Nuevo Mundo, donde el virus se mantiene entre humanos infectados y dos especies de mosquitos exóticos. El vector más importante es el mosquito domesticado *Aedes aegypti*, que colonizó el Nuevo Mundo cuando llegó de África en buques de carga entre el siglo XV y el XVII.

En algunas zonas neotropicales, la transmisión del virus se ve aumentada por el periurbano mosquito tigre asiático *Aedes albopictus*, el cual continúa esparciéndose en Latinoamérica tras establecerse en la costa brasileña hace menos de 30 años. Las etapas inmaduras de ambas especies se multiplican en habitáculos acuáticos, sobre todo en recipientes fabricados por humanos. Los nichos urbanos preferidos por *Aedes aegypti* incluyen, entre otros,



JIM NEWMAN

El mosquito de la fiebre amarilla, *Aedes aegypti*, es el principal vector del dengue. Este insecto invasivo colonizó el Nuevo Mundo tras llegar de África en buques de carga entre los siglos XV y XVII. Se caracteriza por una marca en forma de lira en el dorso del tórax. En la imagen se observa el abdomen repleto de sangre recién ingerida.



Mapa de incidencia del dengue en Latinoamérica. Se indican las áreas con riesgo de transmisión (*azul*) y los brotes registrados (*bolas rojas*). Merced a una colaboración internacional, la información de este mapa se actualiza diariamente. (La imagen corresponde al 19 de diciembre de 2011. Para una versión actualizada de la misma, consulte www.healthmap.org/dengue.)

palanganas, barriles para colectar lluvia, llantas desechadas y maceteros.

La dinámica poblacional y la intensidad de los brotes de dengue en las urbes latinoamericanas son reguladas por varios factores acoplados, que conectan entre sí a los mosquitos vectores, los humanos vulnerables y los virus de dengue en circulación. La transmisión del dengue en los trópicos se halla sincronizada con las lluvias, ya que, al llenar los recipientes que acumulan agua, facilitan la proliferación de vectores. Los mosquitos infectados transportan el virus del dengue a distancias cortas. Es el movimiento de humanos infectados y virémicos (con el virus aún presente en el torrente circulatorio) el principal factor de esparcimiento territorial del virus a través de límites locales, regionales e internacionales.

Incidencia

A escala regional, la incidencia del dengue en Latinoamérica es mayor en los estratos socioeconómicos bajos. Dado que la inmunidad conferida por infecciones previas es temporal y específica del serotipo, las poblaciones que han sufrido una epidemia reciente serán vulnerables a la enfermedad solo si se introduce un nuevo serotipo o si se desvanece la inmunidad con el paso del tiempo. La gravedad de las epidemias en América ha aumentado en las últimas tres décadas debido a que el riesgo de dengue grave crece cuando en una localidad circulan serotipos múltiples.

En la actualidad, cerca de 2,5 billones de personas (el 40 por ciento de la población mundial) viven en sitios con riesgo de transmisión de dengue. La enfermedad es endémica en más de cien países en Asia, África, Oceanía y América. La Organización Mundial de la Salud estima que ocurren más de 500.000 casos de dengue hemorrágico y 22.000 muertes cada año. El dengue circula de forma libre y endémica en Centroamérica, Sudamérica y el Caribe, excepto en Uruguay y Chile continental.

Según la OPS, en 2010 se registraron en Latinoamérica más de 1,8 millones de casos y 1167 muertes. Se detectaron brotes en Argentina, Brasil, Colombia, Cuba, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, México, Venezuela, Puerto Rico, República Dominicana y muchos otros sitios, incluidas áreas en el Caribe Francés e Inglés, y en los Estados Unidos (Cayo Hueso). Hay que tener en cuenta que gran parte de las infecciones no se comunican a las autoridades, por lo que las estadísticas subestiman la incidencia real. Para marzo de 2011, ya se habían registrado más de 200.000 casos, incluidos 2744 casos de dengue grave y 223 muertes. Han sufrido epidemias Bolivia, Perú, Colombia, Argentina, Brasil y Paraguay, entre otros países.

Estrategias

No disponemos todavía de una vacuna contra el dengue. La existencia de cuatro serotipos del virus dificulta el desarrollo de la misma; asimismo, vacunas con efectividad limitada pueden aumentar el riesgo de adquirir DH. Por razones similares, no existen tampoco medicamentos antivirales efectivos contra el dengue.

Por tanto, la única forma de reducir la incidencia de la enfermedad es la supresión del mosquito vector. El uso de insecticidas resulta poco efectivo, costoso en términos económicos y ambientales, y conlleva el desarrollo de resistencia en los mosquitos. La eliminación de sitios de cría para el díptero parece hoy el método más factible para la reducción de la enfermedad, en especial programas con base comunitaria de limpieza de recipientes que acumulan agua. Sin embargo, se requerirán nuevos avances técnicos, un aumento de la voluntad política y el apoyo social para lograr una reducción notable y duradera de la enfermedad [*véase* «El gen destructor», por Bijal P. Trivedi, *en este mismo número*].

—Jorge R. Rey
L. Philip Lounibos
Laboratorio de entomología médica
y Departamento de entomología
y nematología
Universidad de Florida

PALEONTOLOGÍA

Tiranosaurios diminutos

El hallazgo de especies emparentadas con *Tyrannosaurus rex* hace replantear su origen evolutivo

De una altura superior a un autobús de dos pisos y con dientes que se han comparado a plátanos, *Tyrannosaurus rex* era considerado desde hacía tiempo como uno de los animales más temibles que jamás han hollado la Tierra. Otros tiranosaurios conocidos, como *Albertosaurus* y *Tarbosaurus*, presentaban asimismo un tamaño y mordedura aterradores, a pesar de sus brazos absurdos característicos. Pero no todos los tiranosaurios poseían estos rasgos distintivos.

En otoño de 2009 los paleontólogos descubrieron dos tiranosaurios nuevos que están haciendo replantear las ideas que se tenían acerca del megadepredador más popular. Los hallazgos obligan a evaluar de nuevo el origen del plan corporal de los tiranosaurios y a reconsiderar lo que se creía saber sobre la diversidad de este grupo tan estudiado. «Nuestra concepción de la evolución de los tiranosaurios ha cambiado de manera espectacular», afirma Stephen L. Brusatte, estudiante de doctorado del Museo Americano de Historia Natural, en Nueva York.

A lo largo del último decenio se había consolidado la idea de que los tiranosaurios gigantescos como *T. rex* habían evolucionado a partir de antepasados de menor tamaño. Y se pensaba que los rasgos característicos de *T. rex* (entre ellos, un cráneo enorme que le ayudaba a desgarrar carne y triturar huesos, así como unos


HEALTHMAP (*mapa*)

brazos diminutos y unas patas adaptadas para correr) se hallaban íntimamente ligados a la evolución de un gran tamaño corporal. Pero en un artículo publicado en *Science* en octubre de 2009, Paul C. Sereno, de la Universidad de Chicago, y otros autores, entre ellos Brusatte, describieron un nuevo tiranosaurio, *Raptorex kriegsteini*, que refuta esta idea.

Desenterrado en la Mongolia Interior, *Raptorex* vivió hace 125 millones de años, 60 millones de años antes de que *T. rex* merodeara por Norteamérica. El fósil demuestra que el diseño corporal de *T. rex* tuvo de hecho su origen en un dinosaurio grácil, con un peso algo superior al de un humano y un tamaño cien veces inferior al de *T. rex*. Según Thomas R. Holtz, Jr., de la Universidad de Maryland, una autoridad en tiranosaurios que no participó en la investigación, *Raptorex* aclara algunos aspectos intrigantes de la anatomía de *T. rex*. Los paleontólogos se preguntaban hace tiempo por qué las extremidades inferiores de *T. rex* se hallaban adaptadas para correr cuando el enorme peso del tiranosaurio habría impedido una locomoción rápida. Pero la esbeltez de las patas y pies en el más antiguo *Raptorex* indica que la arquitectura de esas extremidades en *T. rex* no es más que un remanente evolutivo de un antepasado más pequeño y veloz.

El hecho de que el plan corporal de *Raptorex* simplemente aumentara de escala en los tiranosaurios posteriores como *T. rex* atestigua el valor adaptativo de esos rasgos distintivos. Pero no todos los miembros del grupo siguieron la misma ruta evolutiva, como revelaron Brusatte y sus colaboradores en un artículo publicado en los *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, en octubre de 2009, donde describían un segundo tiranosaurio.

Alioramus altai, de 65 millones de años de antigüedad, fue descubierto en 2001 en una expedición al desierto de Gobi (Mongolia). El ejemplar poseía una serie de rasgos muy poco habituales en los tiranosaurios. Se estima que pesaba unos 350 kilogramos y que tenía unos nueve años de edad cuando murió. Medía más que *Raptorex*, pero la mitad que un *T. rex* de nueve años de edad (que alcanzaba el tamaño máximo a los 18 años). Según Brusatte, la morfología del cráneo resulta extraordinaria. Además de otros rasgos curiosos, presenta una forma larga y delgada, algo parecida a la de un cocodrilo, y carece de los dientes en forma de plátano y de las crestas frontales engrosadas que dotaban a *T. rex* y otros tiranosaurios de la fuerza necesaria para triturar huesos.

El cráneo de *A. altai* exhibe asimismo ocho pequeños cuernos, entre ellos unos que sobresalen lateralmente desde cada quijada. Aunque modestos comparados con los cuernos de dinosaurios como *Triceratops*, los de *Alioramus* resultan extravagantes para un tiranosaurio. De escasa utilidad defensiva, Brusatte supone que servirían para atraer a la pareja una vez el animal alcanzaba la madurez sexual.

A pesar del aspecto endeble de *A. altai*, bien pudiera ser que sus rasgos delicados le ayudaran a sobrevivir al lado de su te-



CORTESÍA DE PAUL C. SERENO, UNIVERSIDAD DE CHICAGO

El enorme cráneo de *T. rex* destaca frente al de *Raptorex*, un minitiranosaurio recién descubierto en la Mongolia Interior que poseía muchas de las características de sus gigantescos sucesores.

mible hermano mayor, *Tarbosaurus*. Probablemente, la distinta morfología craneana y corporal permitieron la coexistencia de *Alioramus* y *Tarbosaurus*, de la misma manera que leones y guepardos comparten en la actualidad las sabanas africanas, opina Brusatte. Mientras que *Tarbosaurus* tal vez se sirviera de la fuerza para perseguir a animales grandes, *Alioramus* aprovecharía su menor tamaño y agilidad para cazar animales más pequeños. En los frondosos bosques de la Mongolia del Cretáceo Tardío, *Alioramus* debía contar con numerosas presas para elegir, entre ellas distintas especies de dinosaurios de tamaño reducido.

El nuevo fósil *A. altai* permite resolver un antiguo enigma sobre un género descrito solo a partir de un espécimen único y fragmentario, *Alioramus remotus*. Sobre la base de ese primer hallazgo, los investigadores habían debatido si *Alioramus* representaba un antepasado primitivo de los tiranosaurios o un animal más evolucionado, posiblemente relacionado con *T. rex*. Algunos se planteaban incluso si se trataba de un género diferente, y sugerían que los restos podrían corresponder a un *Tarbosaurus* juvenil. Pero el análisis del nuevo ejemplar, mucho más completo, revela su estrecho parentesco con *T. rex*, a pesar de carecer de los rasgos distintivos de los tiranosaurios.

Sin embargo, todavía quedan incógnitas por aclarar acerca de *Alioramus*. Holtz advierte de la necesidad de hallar un *Alioramus* adulto para determinar si los rasgos insólitos del animal respondían a un crecimiento más lento que el de los tiranosaurios mayores, o al simple hecho de finalizar antes su desarrollo.

—Kate Wong

PALEOCLIMATOLOGÍA

Reconstrucción de sequías

Las rogativas que antaño se realizaban para conseguir que lloviera se hallan bien documentadas en los archivos eclesiásticos. Su estudio arroja luz sobre el clima del pasado

El breve período de tiempo del que se dispone de datos meteorológicos —un siglo, en el mejor de los casos— resulta insuficiente para estudiar un sistema como el climático, con múltiples escalas y causas de variabilidad que interactúan de forma no lineal. Por ello, es necesario recurrir a otras fuentes de información climática que nos proporcionen un marco temporal más amplio. Desempeñan esta función las variables «representantes» o «intermediarias» (*proxy*), variables no climáticas cuyo comportamiento está total o parcialmente condicionado por parámetros climáticos.

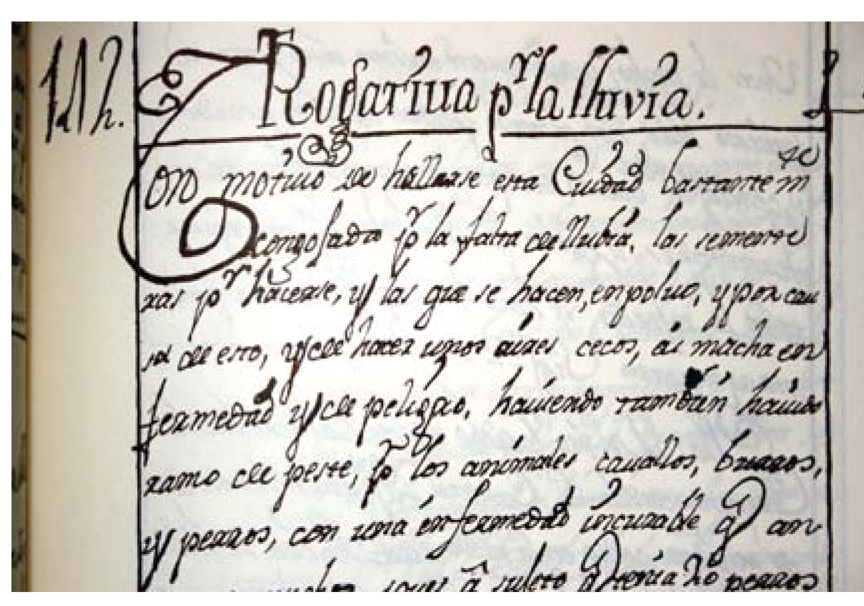
Las variables *proxy* pueden ser extraídas de la naturaleza (anillos de árboles, corales, sondeos de sedimentos terrestres, marinos o hielo, etcétera) o de fuentes documentales (fechas de vendimia, de floración o de rogativas, entre otras). Entre estas últimas destacan, en la península Ibérica, las series de rogativas: ritos religiosos que se realizaban para solicitar a Dios un cambio en la situación meteorológica, bien para conseguir lluvia (rogativas *pro-pluvia)* bien para conseguir la calma del tiempo (rogativas *pro-serenitate)*.

Los primeros en sufrir la meteorología desfavorable solían ser los agricultores, quienes, a través de las instituciones gremiales, avisaban del problema a las autoridades. El gobierno municipal evaluaba la situación y tomaba la decisión de encargar algún tipo de rogativa a la Iglesia. Las autoridades eclesiásticas recibían la orden de realizar la rogativa y la integraban en el calendario regular, convocándola al público en caso de que procediese. Todo este procedimiento, que no duraba más de 2 o 3 días, estaba burocratizado. A cada paso le correspondían unos trámites que se registraban en diferentes archivos, de los que hoy en día nos podemos nutrir para realizar estudios paleoclimáticos.

Las rogativas *pro-pluvia* nos informan sobre todo de la sequía agrícola, es decir, de momentos en los que el suelo no dispone de humedad suficiente para permitir el desarrollo de los cultivos en cualquiera de sus fases de crecimiento. Este tipo de sequías no depende solo de las condiciones meteorológicas, sino también de otros factores, como la biología de los cultivos o las propiedades de los suelos.

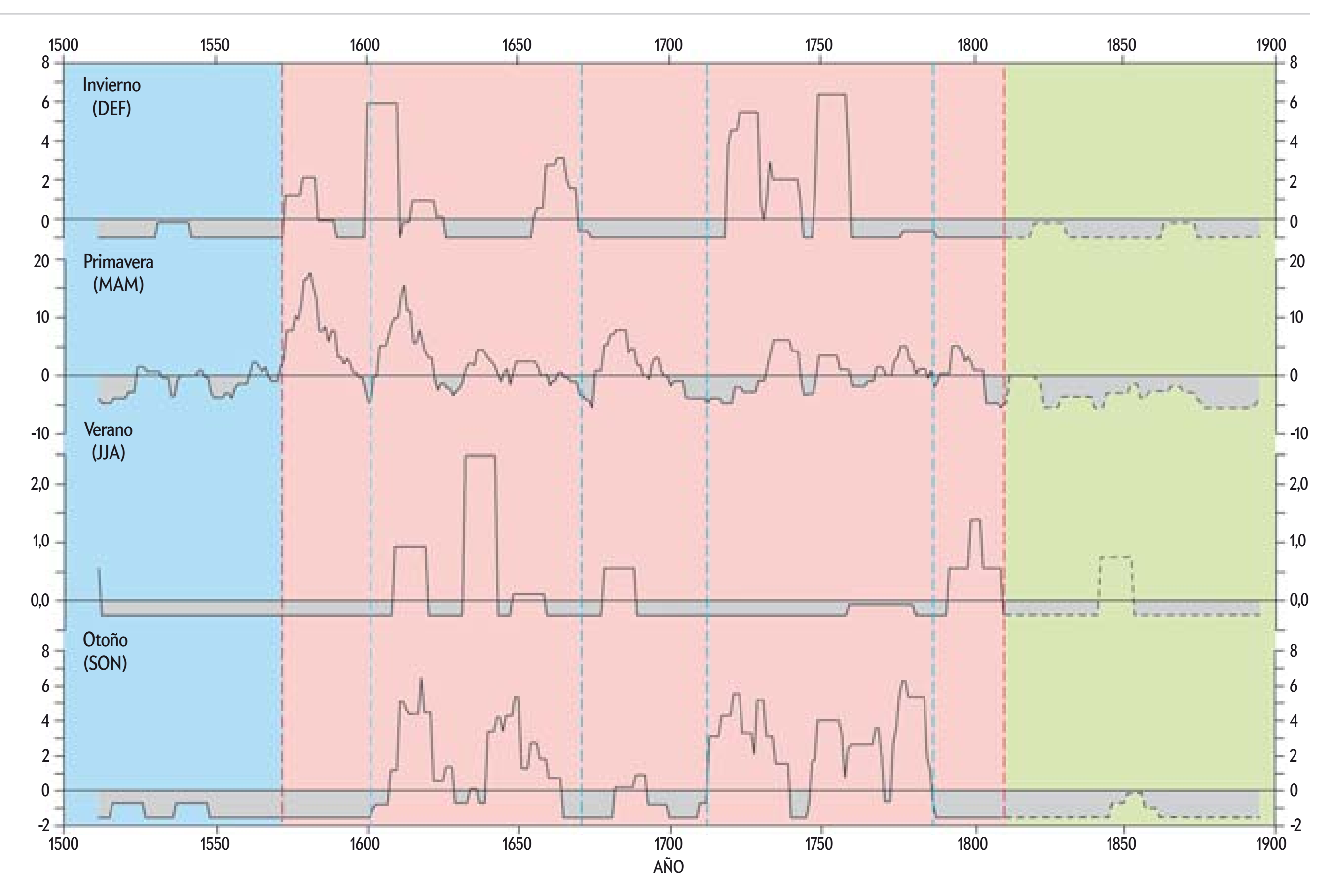
Esa relación entre las actividades agrícolas y las rogativas hace que las celebraciones tengan un marcado carácter estacional, concentrándose la mayoría de ellas en primavera, ya que es la estación en la que los cultivos se ven más expuestos a las variaciones meteorológicas.

Hasta ahora, la gravedad de las sequías se deducía a partir del tipo de acto litúrgico que se llevaba a cabo en cada una de las rogativas. Según la importancia de la misma, se realizaban desde colectas *pro-pluvia* en las misas, hasta peregrinaciones a santuarios de especial veneración, pasando por la exposición de reliquias en la iglesia, procesiones por la ciudad o procesiones extramuros. Sin embargo, estos niveles de gravedad aportan solo información de la magnitud de la sequía, no


Rogativa p.r la lluvia.

Mediante documentos como el de la fotografía se solicitaban rogativas *pro-pluvia*.

ARCHIVO CATEDRALICIO DE BADAJOZ



A partir del estudio de las rogativas registradas en más de 450 volúmenes de actas y libros capitulares de la catedral de Toledo se han reconstruido las sequías que asolaron esa región entre 1576-1800. En la gráfica se representa la media de la diferencia entre la duración del período *pro-pluvia* (PP, períodos en que se celebraban rogativas de manera continuada) respecto a la duración media de los PP, para cada estación. Valores positivos indican una mayor duración de las rogativas y, por tanto, de las sequías. Se distinguen tres etapas: entre 1576 y 1600 (*azul*) aparecen períodos *pro-pluvia* destacables solo en primavera; entre 1601 y 1775 (*rosa*) se observan rogativas en todas las estaciones; entre 1775 y 1810 (*verde*) apenas aparecen rogativas, excepto algunas en verano.

de su duración. Asimismo, no existe una relación lineal entre los ritos litúrgicos y la magnitud de la sequía. Y además, los tipos de liturgia no son siempre comparables entre localidades, ni en períodos distintos.

El registro toledano

Para reducir dicha incertidumbre, en el caso de Toledo se ha trabajado a partir de los períodos de tiempo que las poblaciones dedicaban a celebrar rogativas de manera continuada (menos de 20 días entre celebración y celebración). A esta variable, más precisa y objetiva, la hemos denominado período *pro-pluvia* (PP).

Para generar el registro de rogativas toledanas ha sido necesario consultar más de 450 volúmenes de actas y libros capitulares donde se describe el día a día de la Catedral de Toledo desde el siglo xv. Se han extraído 341 rogativas *pro-pluvia*, 36 *pro-serenitate* y 94 ceremonias de acción de gracias (actos que se realizaban para celebrar que se había solventado el problema meteorológico que había causado el inicio de las rogativas). Las 341 rogativas *pro-pluvia* han sido agrupadas en 110 PP y 50 rogativas individuales (a más de 20 días de otra celebración). Al comparar 10 PP con una serie de días de lluvias en la región, se ha comprobado que estos presentaban una elevada correlación con los días que duraba la sequía.

Centrándonos en el período más homogéneo (1576-1800) y teniendo en cuenta la relación entre las actividades agrícolas y las rogativas explicadas anteriormente, podemos distinguir tres períodos. Entre 1576 y 1600 aparecen períodos *pro-pluvia* destacables solo en primavera. Entre 1601 y 1775 se observan rogativas en todas las estaciones; se distinguen tres subperíodos: el primero (1601-1675), con sequías frecuentes en todas las estaciones del año, es el más extremo; el período medio (1676-1710) está marcado por la bonanza climática, interrumpida solo por algunas sequías primaverales y muy escasas veraniegas; y el período final, (1711-1775), con sequías en todas las estaciones del año a excepción del verano. Entre 1775 y 1810, en cambio, apenas aparecen rogativas, si bien llama la atención la acumulación de algunas sequías en verano.

Ese tipo de estudios nos permiten disponer de un registro de sequías en un marco temporal mucho más amplio del que podríamos obtener de las estaciones meteorológicas, lo que facilita la comprensión de este complejo fenómeno climático. En la actualidad se han recuperado series de rogativas en 13 localidades españolas; el proyecto Salvà-Sinobas (salva-sinobas.uvigo.es) está recuperando algunas más. Con toda esta información se espera poder realizar una reconstrucción no solo de la gravedad de las sequías en un punto concreto, sino de la distribución de las mismas a escala peninsular durante los últimos cuatro siglos.

—Fernando Domínguez Castro
Departamento de física
Universidad de Extremadura
Badajoz

LOS PRIMEROS AMERICANOS

Se ha descubierto que los humanos colonizaron el Nuevo Mundo mucho antes de lo que se pensaba. El hallazgo obliga a replantear las ideas establecidas sobre estos pioneros

Heather Pringle

Bajo el calor sofocante de una tarde de julio, Michael R. Waters se aproxima al yacimiento donde un pequeño grupo de arqueólogos excavan con sus paletas en lo que un día fue una llanura de inundación. Un miembro del equipo le entrega un fragmento de sílex de color gris azulado cubierto de tierra. Waters, arqueólogo del Centro para el Estudio de los Primeros Americanos de la Universidad A&M de Texas, lo voltea en sus manos y lo examina con una lupa. El hallazgo, poco más grande que la uña de un pulgar, formaba parte de un versátil utensilio de corte, el equivalente a una herramienta multiusos actual. El artefacto, abandonado hace miles de años en la orilla de un arroyo de Texas, constituye uno de los miles de útiles que están haciendo retroceder en el tiempo el origen de los humanos del Nuevo Mundo y están ofreciendo una nueva visión sobre los primeros americanos.

El trabajo de Waters está contribuyendo a derrumbar el modelo establecido sobre los primeros pobladores del Nuevo Mundo. Durante décadas se ha defendido que se trataba de grupos de cazadores procedentes de Asia que habían seguido la ruta de los mamuts y otras grandes presas hacia el este, a través de Beringia, una masa de tierra hoy sumergida que conectaba el norte de Asia y Alaska. Según esa idea, los colonizadores habrían llegado a América hace unos 13.000 años y se habrían desplazado pronto hacia el sur a través de un corredor desprovisto de hielo entre Yukón y Alberta. En su expansión hacia lo que hoy es EE.UU., dejaron tras ellos instrumentos líticos característicos. Los arqueólogos denominaron clovis a esos cazadores, a raíz de los numerosos útiles de ese tipo hallados en un yacimiento cercano a Clovis, en Nuevo México.



TYLER JACOBSEN



Heather Pringle es escritora científica y redactora de la revista *Archaeology*.



A lo largo del último decenio, los nuevos descubrimientos han puesto en entredicho el modelo sobre el primer poblamiento clovis. En el sur de Chile, en el yacimiento Monte Verde, el equipo de Thomas D. Dillehay, de la Universidad Vanderbilt, ha encontrado indicios de antiguos americanos que vivían en tiendas hechas con pieles y consumían productos del mar y una variedad silvestre de la patata. El yacimiento data de hace 14.600 años, mucho tiempo antes de la aparición de los cazadores clovis. Instigados por ese hallazgo, algunos científicos empezaron a buscar pruebas similares en Norteamérica. Y dieron con ellas. En las cuevas de Paisley Five Mile Point, en Oregón, se descubrieron excrementos humanos de hace 14.400 años que contenían semillas de un perejil del desierto y de otras plantas. Un tipo de alimentos que no esperaríamos encontrar en el menú de un cazador especializado en grandes presas. Para Dennis L. Jenkins, director de las excavaciones de las cuevas de Paisley y arqueólogo del Museo de Historia Natural y Cultural de Eugene (Oregón), las observaciones hacen pensar en una economía de subsistencia mucho más amplia.

En el arroyo de Buttermilk, el grupo de Waters ha realizado hace poco uno de los hallazgos más importantes: un auténtico filón de instrumentos líticos de 15.500 años de antigüedad. De hecho, el equipo ha recuperado más de 19.000 útiles preclovis (anteriores a los clovis), entre ellos pequeñas láminas, quizás empleadas para cortar piel, y fragmentos de hematites, un mineral de hierro que durante el Paleolítico se utilizaba para obtener pigmento rojo. El yacimiento, cuyo descubrimiento se hizo público la pasada primavera, alberga más instrumentos preclovis que el resto de yacimientos del mismo tipo juntos. Waters no ha reparado en esfuerzos para obtener múltiples dataciones de cada nivel arqueológico. El trabajo ha impresionado a muchos expertos. Para Vance T. Holliday, antropólogo y geólogo de la Universidad de Arizona, representa la mejor prueba de la existencia de pobladores norteamericanos anteriores a los clovis.

Gracias a esos hallazgos, los arqueólogos han empezado a proponer nuevos modelos sobre el poblamiento del Nuevo Mundo. A partir de los datos que proporcionan los estudios genéticos o geológicos, se están buscando respuestas a diversas cuestiones importantes: ¿De dónde procedían los americanos primitivos de hace más de 15.500 años? ¿Cuándo llegaron y qué ruta utilizaron para llegar al Nuevo Mundo? Por primera vez desde hace decenios, se percibe la sensación emocionante que suele preceder los nuevos avances. Según James M. Adovasio, arqueólogo del Colegio Mercyhurst, en este momento se están planteando preguntas fundamentales sobre las circunstancias que acompañaron la dispersión de los humanos en el último gran hábitat del planeta.

HUELLAS GENÉTICAS

El poblamiento del Nuevo Mundo constituye una de las grandes hazañas de la humanidad. Se necesitó una gran resistencia y una gran capacidad de adaptación para soportar ambientes tan diversos como el tormentoso Ártico, el sofocante calor del Amazonas y los fuertes vientos de Tierra de Fuego. Según François Bordes, prehistoriador de mediados del siglo xx, ese logro no se igualará hasta que el hombre colonice un planeta de otra estrella. Desde hace tiempo, los arqueólogos han intentado reconstruir el inicio de esa aventura transcontinental, a pesar de la dificultad que entraña localizar yacimientos antiguos de una pequeña población de cazadores y recolectores nómadas en los extensos y yermos territorios de Norteamérica y de Asia. Pero en el último decenio, los genetistas han abordado esa búsqueda mediante técnicas moleculares. Al investigar el ADN de pueblos indígenas, han hallado nuevas pistas sobre la procedencia y el momento en que se produjo el poblamiento.

En más de una decena de estudios se han analizado muestras de ADN antiguo y actual de grupos de indígenas americanos. Se han investigado las mutaciones o los marcadores genéticos que definen los haplogrupos, los linajes humanos más importantes. Los resultados demuestran que los indígenas de América descienden de una población con cuatro haplogrupos por vía materna (A, B, C y D) y otros dos por vía paterna (C y Q). Para averiguar el origen de estos haplogrupos, diferentes equipos han indagado en poblaciones humanas del Viejo Mundo cuya diversidad genética abarcaba todos los linajes. Solo los habitantes actuales de Siberia meridional, desde los montes Altai al oeste y el río Amur al este, poseen un perfil genético similar. Este hecho indica que muy probablemente los antepasados de los primeros americanos procedían de esa región del este de Asia.

Los datos confirmaron lo que sospechaban la mayoría de los arqueólogos sobre la procedencia de los primeros americanos. También había numerosos indicios de que la cronología propuesta de un primer poblamiento clovis era incorrecta. A partir de los ritmos de mutación del ADN humano, los genetistas han calculado que los antepasados de los indios americanos se separaron de sus parientes asiáticos hace entre 25.000 y 15.000 años, una época difícil para una gran migración por el norte. Enormes glaciares inundaban los valles y montañas del nordeste de Asia, al tiempo que grandes masas de hielo cubrían la mayor parte de Canadá, Nueva Inglaterra y varios estados del norte de Estados Unidos. De hecho, las reconstrucciones paleoclimáticas realizadas a partir de datos de testigos de hielo de Groenlandia y de la variación en el nivel del mar del planeta demuestran que esas masas de hielo alcanzaron su máxima extensión durante el período glacial de hace entre 22.000 y 19.000 años. Pero, según David Meltzer, arqueólogo de la Universidad Metodista del Sur, aquellos humanos presentaban una extraordinaria capacidad

EN SÍNTESIS

Durante mucho tiempo se pensaba que los primeros americanos fueron los pueblos clovis, que habrían llegado al Nuevo Mundo hace unos 13.000 años desde el norte de Asia.

Pero recientes descubrimientos arqueológicos indican que los humanos llegaron a América varios miles de años antes.

Estos hallazgos, junto con nuevos análisis genéticos y geológicos, han hecho reconsiderar cuestiones como la procedencia de esos pioneros, el momento de su llegada y su ruta de entrada hacia al Nuevo Mundo.

para desplazarse en ese paisaje; su propia existencia, la de sus conocidos y la de sus antepasados se basaba en una singular adaptación al entorno, para lo cual disponían de un amplio abanico de estrategias.

Ataviados con ropa de abrigo, confeccionada con piel cosida con tendones y agujas de hueso, y provistos de un enorme conocimiento de la naturaleza, los antepasados de los paleoamericanos se adentraron en un mundo ártico del que no existe paralelo hoy en día. Las masas de hielo que cubrían el norte de Europa y Norteamérica retenían una enorme cantidad de agua, lo que había provocado un descenso de más de 100 metros en el nivel del mar y había dejado al descubierto amplias plataformas continentales de Asia y del noroeste de Alaska. Las tierras emergidas, junto con regiones adyacentes de Siberia, Alaska y el norte de Canadá, formaron un territorio que conectaba el Viejo Mundo con el Nuevo Mundo.

La tierra emergida, Beringia, habría representado la primera estación de paso de los nómadas preclovis. Las masas de aire que barrían la región eran tan secas que apenas dejaban nevadas, lo que impedía la acumulación de hielo en superficie. En esas zonas proliferaban gramíneas, plantas perennes y otras especies adaptadas al frío. Así lo indican los restos vegetales enterrados bajo una capa de ceniza volcánica en el noroeste de Alaska y los hallados en intestinos congelados de grandes herbívoros que pastaron en Beringia. Esas plantas formaban praderas y tundras áridas donde habitaban mamuts lanudos, de hasta nueve toneladas de peso, así como perezosos gigantes, bisontes de estepa, bueyes almizcleros y caribúes. Los estudios genéticos de las poblaciones actuales de león marino de Steller sugieren que este mamífero se reproducía en las rocas de las islas que había a lo largo de la orilla del sur de Beringia. De esta forma, los pueblos nómadas no solo habrían obtenido alimento de los mamíferos terrestres, sino también de los marinos.

La opinión más extendida propone que los pioneros atravesaron Beringia con rapidez en busca de territorios más cálidos y hospitalarios. Sin embargo, algunos piensan que la travesía se habría alargado más. Los principales linajes genéticos de los indios americanos presentan una mayor abundancia de haplotipos de tipo fundador (combinaciones de secuencias de ADN que se hallan ligadas en los cromosomas y suelen heredarse a la vez) que la observada en las poblaciones asiáticas. Tal hecho indica que, durante su trayecto hacia el Nuevo Mundo, los primeros americanos se detuvieron en algún sitio donde evolucionaron de forma aislada durante miles de años antes de adentrarse en las Américas. Beringia representa el lugar más probable donde se produjo esa evolución genética. Allí los grupos nómadas se habrían separado de sus parientes asiáticos hace unos 22.000 años, cuando el enfriamiento climático forzó a los pueblos de Siberia a retirarse hacia el sur.

Aunque no sepamos con seguridad si los nómadas hicieron un alto en el camino en Beringia o en alguna otra parte en el noreste de Asia, en un determinado momento los pobladores se desplazaron hacia el este y hacia el sur. Hace 19.000 años se inició un período de calentamiento climático que fue reduciendo las masas de hielo que cubrían Norteamérica. Gradualmente se crearon dos rutas de paso hacia el sur que hicieron posibles nuevas y múltiples migraciones. Según varios estudios realizados en los últimos diez años sobre la distribución geográfica de la diversidad genética de los indígenas americanos actuales, los primeros pobladores colonizaron el Nuevo Mundo hace entre 18.000 y 15.000 años. Una fecha que encaja con las nuevas pruebas arqueológicas de una población preclovis.

LA RUTA LITORAL

Según los arqueólogos, los primeros americanos se fueron desplazando hacia el sur a medida que exploraban territorios vírgenes y salvajes. Jon M. Erlandson, de la Universidad de Oregón, reflexiona sobre los nuevos indicios de ese trayecto. Ha pasado la mayor parte de su vida excavando en yacimientos a lo largo de la costa de California y es uno de los primeros autores que propuso la hipótesis de la ruta costera o del litoral. Los partidarios del modelo de un primer poblamiento clovis consideran que los humanos llegaron a América por una ruta terrestre. En cambio, Erlandson piensa que lo hicieron por el mar en pequeños botes: desde el este de Asia navegaron hacia el sur de Beringia y descendieron por la costa occidental de América. Junto con su colega Todd J. Braje, de la Universidad estatal en San Diego, han descubierto nuevas pruebas de los antiguos marineros que partieron de Asia oriental y finalizaron su viaje en las costas de Chile.

La idea de la ruta litoral ya se había planteado a finales de los años setenta del siglo xx, cuando Knut Fladmark, profesor emérito de la Universidad Simon Fraser de la Columbia Británica, examinaba datos geológicos y palinológicos para realizar una reconstrucción paleoambiental de la costa occidental de Canadá. En aquel momento, la mayoría de los expertos creían que la costa del noroeste estuvo cubierta por grandes masas de hielo hasta el final del último período glacial. Pero los análisis publicados en los años sesenta y setenta sobre el polen fósil de las marismas litorales demostraron que, hace 13.000 años, en la península Olímpica del estado de Washington había un bosque de coníferas. A lo largo de la costa se podían encontrar también otras zonas de vegetación dispersas. Fladmark afirma que los primeros americanos que acamparon en estos lugares se habrían alimentado de recursos de origen marino, como el marisco, crustáceos y salmones en migración. También habrían cazado aves acuáticas que emigraban a lo largo del litoral del Pacífico, así como caribúes y otros grandes animales terrestres que pastaban en los refugios de vegetación más extensos.

Hoy se sabe que la mayor parte de la Columbia Británica no se hallaba cubierta de hielo hace al menos 16.000 años. Aunque todavía no se han recuperado restos de barcos en yacimientos arcaicos del litoral americano, muchos piensan que los colonos disponían de conocimientos de navegación, ya que hace al menos 45.000 años los humanos viajaban de isla a isla desde Asia a Australia. Por distintos motivos, navegar hacia el sur por la costa occidental del Nuevo Mundo habría resultado más fácil que utilizar la ruta terrestre. «El medio varía poco de norte a sur, lo que la convierte en la vía menos complicada», afirma Quentin Mackie, de la Universidad de Victoria en la Columbia Británica.

Pero descubrir yacimientos de los antiguos marineros representa una tarea ardua. Cuando las masas de hielo de las épocas glaciales se fundieron, el agua resultante elevó el nivel del mar y las antiguas costas quedaron sumergidas a varios metros de profundidad. Sin embargo, el pasado marzo, Erlandson y Braje publicaron en la revista *Science* hallazgos sorprendentes sobre los marineros en un nuevo yacimiento de la isla de Santa Rosa, en la costa meridional de California. Hace casi 12.000 años, los paleoamericanos navegaron 10 kilómetros en mar abierto para alcanzar la isla, un viaje que habría requerido algún tipo de embarcación.

El nuevo yacimiento, CA-SRI-512W, se ubica en la entrada de un barranco, cerca de lo que habría sido un pantano. Enterrados en el sedimento, Erlandson y su equipo descubrieron pruebas de presencia humana, entre ellas huesos de aves y car-

Un poblamiento antiguo

Según la imagen tradicional de la colonización de América, hace 13.000 años los grupos clovis, cazadores procedentes de Asia, atravesaron en poco tiempo Beringia, un territorio ahora sumergido, para dispersarse después por Norteamérica y hacia regiones meridionales más cálidas. Sin embargo, en el último decenio se han hallado pruebas contradictorias con la teoría de un primer poblamiento clovis. Las últimas investigaciones geológicas y arqueológicas indican que los humanos llegaron al Nuevo Mundo miles de años antes de que los clovis dejaran tras de sí sus característicos instrumentos líticos. Los datos apuntan a la existencia de dos rutas migratorias: una litoral y otra interior a través de un corredor sin hielo.

La ruta terrestre: el corredor sin hielo

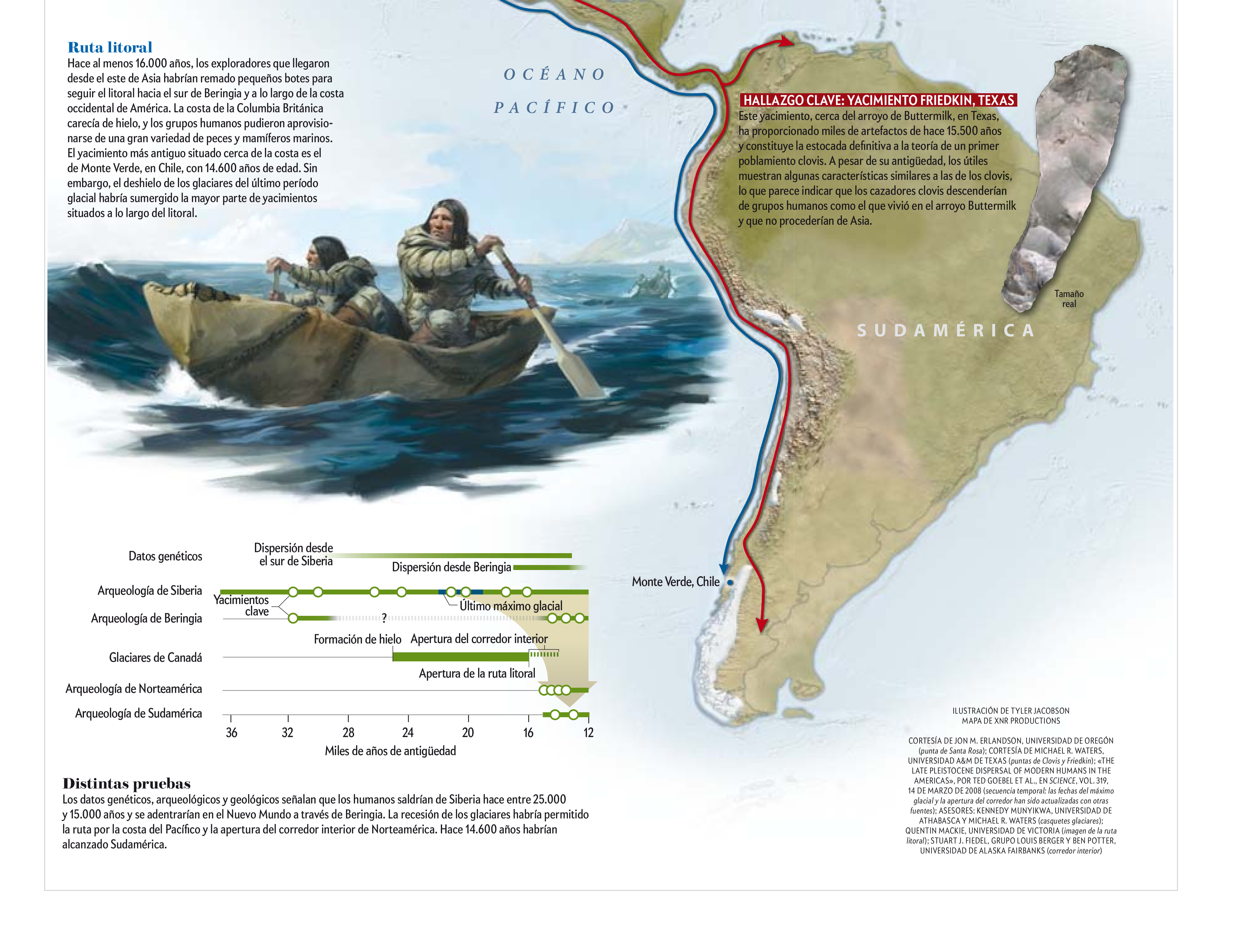
Según el modelo del primer poblamiento clovis, los casquetes de hielo de las Rocosas y de Laurentia no se separaron hasta hace 13.000 años, lo que habría impedido una migración por vía terrestre anterior a los clovis. Pero nuevos datos geológicos señalan que el corredor se abrió hace 15.000 años. Los grupos que viajaron a través de él habrían cazado aves y dispondrían de perros para transportar sus enseres. Con un desplazamiento de 16 kilómetros al día, los nómadas habrían cruzado el corredor en tan solo cuatro meses.

HALLAZGO CLAVE: ISLA DE SANTA ROSA, CALIFORNIA

Se descubren puntas de flecha características, con forma de árbol de Navidad, de unos 11.800 años de antigüedad, muy similares a algunos útiles líticos hallados en Asia oriental que datan de hace 15.000 años, lo que apunta a una ruta migratoria a lo largo de la costa norte del Pacífico.

CONJUNTO FAMOSO: CLOVIS, NUEVO MÉXICO

En los años treinta del siglo xx, en la Localidad nº 1 de Blackwater cercana a Clovis, en Nuevo México, y en otros yacimientos se recuperaron puntas largas, resistentes y acanaladas que servían para abatir grandes presas, como los mamuts lanudos. Durante muchos años, las puntas clovis y otros artefactos se consideraban la prueba humana más antigua del Nuevo Mundo sobre la que se construyó el modelo del primer poblamiento clovis en América.



Ruta litoral

Hace al menos 16.000 años, los exploradores que llegaron desde el este de Asia habrían remado pequeños botes para seguir el litoral hacia el sur de Beringia y a lo largo de la costa occidental de América. La costa de la Columbia Británica carecía de hielo, y los grupos humanos pudieron aprovisionarse de una gran variedad de peces y mamíferos marinos. El yacimiento más antiguo situado cerca de la costa es el de Monte Verde, en Chile, con 14.600 años de edad. Sin embargo, el deshielo de los glaciares del último período glacial habría sumergido la mayor parte de yacimientos situados a lo largo del litoral.

HALLAZGO CLAVE: YACIMIENTO FRIEDKIN, TEXAS

Este yacimiento, cerca del arroyo de Buttermilk, en Texas, ha proporcionado miles de artefactos de hace 15.500 años y constituye la estocada definitiva a la teoría de un primer poblamiento clovis. A pesar de su antigüedad, los útiles muestran algunas características similares a las de los clovis, lo que parece indicar que los cazadores clovis descenderían de grupos humanos como el que vivió en el arroyo Buttermilk y que no procederían de Asia.

Distintas pruebas

Los datos genéticos, arqueológicos y geológicos señalan que los humanos saldrían de Siberia hace entre 25.000 y 15.000 años y se adentrarían en el Nuevo Mundo a través de Beringia. La recesión de los glaciares habría permitido la ruta por la costa del Pacífico y la apertura del corredor interior de Norteamérica. Hace 14.600 años habrían alcanzado Sudamérica.

ILUSTRACIÓN DE TYLER JACOBSON
MAPA DE XNR PRODUCTIONS

CORTESÍA DE JON M. ERLANDSON, UNIVERSIDAD DE OREGÓN (*punta de Santa Rosa*); CORTESÍA DE MICHAEL R. WATERS, UNIVERSIDAD A&M DE TEXAS (*puntas de Clovis y Friedkin*); «THE LATE PLEISTOCENE DISPERSAL OF MODERN HUMANS IN THE AMERICAS», POR TED GOEBEL ET AL., EN *SCIENCE*, VOL. 319, 14 DE MARZO DE 2008 (*secuencia temporal: las fechas del máximo glacial y la apertura del corredor han sido actualizadas con otras fuentes*); ASESORES: KENNEDY MUNYIKWA, UNIVERSIDAD DE ATHABASCA Y MICHAEL R. WATERS (*casquetes glaciares*); QUENTIN MACKIE, UNIVERSIDAD DE VICTORIA (*imagen de la ruta litoral*); STUART J. FIEDEL, GRUPO LOUIS BERGER Y BEN POTTER, UNIVERSIDAD DE ALASKA FAIRBANKS (*corredor interior*)

bones de 11.800 años de antigüedad, según las dataciones radiocarbónicas. En ese lugar, los primitivos cazadores habrían consumido aves acuáticas y marinas, tales como gansos y cormoranes de Canadá, así como algún mamífero pinnípedo, el grupo que incluye las focas y los leones marinos. También dejaron tras de sí restos líticos de una tecnología particular: más de cincuenta puntas con pedúnculo, con el aspecto de pequeños árboles de Navidad de color marrón. Las puntas pudieron haber formado parte de dardos o flechas con los que se cazarían pájaros o pequeños mamíferos marinos. Erlanson destaca su extraordinaria delicadeza y concienzuda elaboración. Pero más importante aún, su diseño y fabricación difieren en gran medida de las grandes puntas, largas y acanaladas, que creaban los clovis para cazar grandes presas.

Al preguntarse por el origen de esa tecnología del litoral, Erlandson y Braje consultaron los estudios de otros yacimientos arqueológicos en busca de pistas. Descubrieron que se habían encontrado puntas pedunculadas semejantes en otros yacimientos dispersos a lo largo de la costa norte del océano Pacífico. Los más antiguos, de unos 15.000 años, se localizaban en el este de Asia, en la península de Corea, Japón y en Rusia oriental. Además, cuanto más se alejaba uno de esta región, más recientes eran los yacimientos que contenían esos artefactos. Se han desenterrado puntas pedunculadas de 14.000 años en Oregón y de 12.000 años en las islas del Canal, en Baja California, y a lo largo de la costa de Sudamérica. Erlandson sacude su cabeza con admiración y afirma que algunos de los conjuntos líticos de puntas halladas en Japón son muy similares a los de las islas del Canal.

Erlandson y Braje piensan que la distribución de este tipo de tecnología señala la ruta de migración de los primeros americanos a lo largo de la costa norte del Pacífico, un camino que les habría proporcionado alimento abundante. Ciertas algas, las laminarias, crecen en esas aguas frías ricas en nutrientes y forman densos bosques marinos litorales que sirven de hábitat a especies tan diversas como peces de roca, orejas de mar y nutrias marinas. Esos bosques marinos habrían prosperado a lo largo de la costa meridional de Beringia incluso durante el último período glacial. Los estudios sobre la temperatura del océano de hace unos 18.000 años indican que a lo largo de la costa sur de Beringia el hielo marino solo se formaba en invierno, y que el período estacional de frío intenso no habría suprimido los grandes bosques de algas. La planta sobrevive debajo del hielo en estado inactivo durante meses; al llegar el verano, crece con rapidez y crea un hábitat marino muy rico. Pero no solo las laminarias habrían facilitado la migración a lo largo del litoral, según Erlandson. Hay una enorme cantidad de otros recursos en los estuarios marinos y en las rutas que utilizan los salmones. De hecho, a lo largo de esa ruta hallamos centenares de especies comestibles, desde cetáceos hasta algas marinas.

Los paleoamericanos que exploraron ese mundo costero tan rico no se apresuraron en su marcha hacia el sur. De hecho, algunos investigadores piensan que se habrían desplazado apenas un kilómetro cada año, a medida que ampliaban sus territorios de caza y recolección hacia el sur. «No fue una carrera a lo largo de la costa», concluye Erlandson. «Mientras se trasladaban a tierras despobladas, debían mantener contactos con otros grupos para poder casarse. Necesitaban seguir relacionándose con los grupos humanos que quedaban atrás.»

EL CORREDOR INTERIOR

La costa occidental de América no constituyó la única ruta que emplearon los primeros colonos. Durante los últimos cinco años, un equipo de geólogos y expertos en dataciones dirigido por Kennedy Munyikwa, geólogo de la Universidad de Athabasca, en Alberta, ha estado reexaminando otra posible vía de propagación. Era la que defendían los partidarios del modelo de un primer poblamiento clovis, que perdió protagonismo tras el descubrimiento de pobladores pre-clovis en el yacimiento de Monte Verde, cerca de la costa de Chile. La ruta, conocida como el corredor sin hielo, se creó en el interior del continente cuando el glaciar que cubría Norteamérica, Laurentia, empezó a retirarse hacia el este y se fue separando de la masa de hielo que cubría la cordillera de las montañas Rocosas al oeste. Cuando se desecaron los extensos lagos glaciales que impedían el paso, quedó una región de tierra seca. El corredor resultante al este de las montañas Rocosas se extendía casi 1900 kilómetros, desde Alaska hacia los estados del sur.

El interés reciente por esta ruta proviene de las nuevas fechas propuestas sobre su origen, publicadas por el grupo de Munyikwa el pasado junio en la revista *Quaternary Geochronology*. En los años ochenta del siglo xx, los investigadores del Servicio Geológico de Canadá establecieron la antigüedad del corredor mediante la datación con carbono 14 de restos de plantas conservados en el sedimento en diferentes puntos de la ruta. Los resultados indicaban que las dos enormes masas de hielo se dividieron y que los lagos glaciales se desecaron hace alrededor de 13.000 años. Ese marco cronológico encajaba bien con el escenario propuesto por un primer poblamiento clovis, aunque el trayecto resultaría impracticable en una migración anterior.

Pero cuando Munyikwa examinó los primeros estudios durante un proyecto sobre cambios paleoambientales, observó algunos fallos importantes. Las fechas calculadas mediante carbono 14 eran escasas y algunas de ellas poco fiables. Por otra parte, la datación de plantas determinaba cuándo se había restablecido la vegetación en el corredor, pero no cuándo se había retirado el hielo ni cuándo se habían secado los lagos. De ahí que Munyikwa y sus colaboradores decidieran volver a datar el origen del corredor por el método de la luminiscencia estimulada ópticamente (OSL). El equipo se centró en una parte de la ruta interior en el norte de Alberta, donde se encuentran grandes depósitos de arena (algunos de más de 10 metros de altura) formados por sedimentos transportados por el viento después del retroceso del glaciar de Laurentia.

Para obtener las muestras para datar, el equipo de Munyikwa realizó cortes en las dunas más altas de esa región. En las paredes de las secciones clavaron horizontalmente tubos de plástico negro. Tapados por uno de sus extremos, los tubos se llenaban de arena que no había sido expuesta a la luz del sol desde la formación de la duna. Posteriormente, se dataron las muestras mediante OSL, que permite determinar la cantidad de energía de radiación ambiental atrapada en minerales como el feldespato. Los resultados demostraron que las dunas de arena se formaron hace entre 15.000 y 14.000 años, un intervalo que constituiría la edad mínima de la ruta. Ya que, según Munyikwa, cabe la posibilidad de que las dunas se originaran 1000 años después de la fusión del hielo. Por otra parte, durante esa época, el corredor en el norte de Alberta medía unos 400 kilómetros de anchura y tal vez presentara algunos lagos de hielo fundido. Munyikwa precisa que la arena que se acumuló en las dunas procedía del fondo de los lagos secos.

La gran pregunta es si durante esa época el corredor resultaría transitable en todo su recorrido, en particular en su tramo más al norte. Munyikwa piensa que sí. En fecha reciente, su equipo ha obtenido fechas similares en dunas de arena mucho más



En la excavación cerca del arroyo Buttermilk, en Texas, se han recuperado instrumentos líticos anteriores a la cultura clovis. Los cazadores habrían acudido a este lugar para explotar el sílex local con el que fabricar sus utensilios.

al norte, a lo largo de la frontera entre Alberta y el Territorio del Noroeste. Munyikwa afirma que esos datos se ajustan con lo que conocemos hoy en día sobre la capa de hielo de Laurentia. Según la opinión mayoritaria de los geólogos, esa capa se habría retirado hacia el noreste en un frente ancho, no en pequeños lóbulos. Se concuerda en que el corredor sin hielo se extendía al norte. De ser así, los exploradores habrían podido recorrer la vía interior hace unos 15.000 años, apenas 1000 años después de que se abriese la ruta por la costa occidental.

Para Jack Ives, de la Universidad de Alberta en Edmonton, las dataciones por OSL ofrecen una nueva perspectiva sobre el corredor, lo que reaviva el debate sobre las rutas de migración. «Se dice, de forma errónea, que la región del corredor se ha investigado en profundidad, cuando en realidad se trata de una superficie vasta de la que sabemos muy poco», afirma Ives. Las pruebas más antiguas, ampliamente aceptadas, de presencia humana en el norte del corredor están datadas en unos 12.000 años. Pero Ives piensa que en el futuro los trabajos arqueológicos desvelarán yacimientos de tiempo aún más remoto.

Erosionado por el hielo y los fríos vientos, el nuevo corredor debió de parecer un lugar extraordinario para los primeros pobladores. Según Stuart J. Fiedel, arqueólogo del Grupo Louis Berger en East Orange (Nueva Jersey), puede que los cazadores-recolectores de Beringia decidieran explorarlo después de ver multitudes de aves acuáticas que se dirigían al sur en otoño y volvían en primavera. El alimento habría escaseado, pero los exploradores habrían cazado aves ricas en calorías o presas más grandes. Análisis genéticos recientes indican que las cabras de montaña pastaban en dos regiones de refugio en el Yukón y en el norte de la Columbia Británica.

Los viajeros pudieron haber contado con la ayuda del mejor amigo del hombre. Según las pruebas paleontológicas, los pueblos cazadores de Siberia habrían domesticado a los lobos hace unos 33.000 años. Fiedel piensa que los primeros perros habrían sido excelentes compañeros de caza y animales de transporte en la migración a través del corredor. Según él, en épocas históricas, los pueblos cazadores-recolectores de las Grandes Llanuras ensillaban los perros y les enganchaban distintos tipos de carga, desde pieles para abrigarse o construir tiendas hasta alimentos almacenados. Fiedel dice que algunos experimentos han demostrado que los animales pueden acarrear unos 27 kilogramos. Además, un estudio publicado en 1994 demostró que, si la temperatura ambiental se mantiene fresca, los perros cargados con 13 kilogramos de peso pueden recorrer 27 kilómetros al día. Además, en períodos de hambruna, los nómadas se habrían comido algunos de ellos.

Al considerar un desplazamiento de 16 kilómetros por día, Fiedel ha calculado que los colonos habrían alcanzado el extremo sur del corredor en cuatro meses. Cuando dejaron atrás las regiones pedregosas e inhóspitas, habrían divisado por primera vez un paisaje de abundancia impresionante: praderas cálidas ocupadas por manadas de mamuts, bisontes y caballos; pantanos y lagos donde proliferaban las aves acuáticas; océanos rebosantes de pescados y mamíferos marinos. Se trataba de un territorio sin ningún rival humano, un nuevo mundo de posibilidades.

EL ORIGEN DE LOS CLOVIS

En una casa sombría, que sirve como base del campamento durante la excavación en el arroyo Buttermilk, Waters retira la tapa de una caja negra del tamaño de un ordenador portátil. De ella extrae una herramienta, y después otra, de un total de unos veinte artefactos preclovis que contiene. Fabricadas con un tipo de sílex brillante presente muy cerca del arroyo Buttermilk, las láminas y las otras herramientas son compactas y ligeras, de apenas algunos centímetros de longitud. Waters piensa que resultarían de enorme utilidad a los exploradores, gente en constante movimiento que recorría una tierra desconocida.

En algunos de estos útiles, en concreto en las láminas y en los bifaciales, Waters ha hallado algo más: una nueva pista sobre el origen de los clovis. Unos 2500 años después de que los pueblos preclovis produjeran ese tipo de herramientas, los cazadores clovis emplearon técnicas de talla similar en toda Norteamérica para crear láminas más grandes y largas, algunas de 21 centímetros o más de longitud. Esta continuidad tecnológica, observa Waters, indica una relación íntima entre los dos grupos. En vez de ser nómadas procedentes de Asia, los cazadores clovis pudieron haber descendido de antiguos grupos de cazadores, como el que ocupó el arroyo Buttermilk. «Parece como si su origen se situase al sur de las masas de hielo», comenta Waters.

De lo que no hay ninguna duda es de que los primeros americanos y sus descendientes eran gente resistente y con inventiva, pioneros que se dispersaron por la mayor extensión geográfica que nunca hayan encontrado los seres humanos. Estimulados por lo desconocido, se adaptaron perfectamente a la gran variedad de ecosistemas que ofrecían los dos continentes. «Los primeros americanos merecen nuestra admiración», comenta el arqueólogo David Anderson, de la Universidad de Tennessee. «Ejemplifican el espíritu de supervivencia y de aventura que representa lo mejor de la humanidad.»

PARA SABER MÁS

Paleoindian seafaring, maritime technologies, and coastal foraging on California's Channel Islands. Jon M. Erlandson et al. en *Science*, vol. 331, págs. 1181-1185, 4 de marzo de 2011.
The Buttermilk Creek complex and the origins of clovis at the Debra L. Friedkin site, Texas. Michael R. Waters et al. en *Science*, vol. 331, págs. 1599-1603, 25 de marzo de 2011.
Constraining the late Wisconsinan retreat of the Laurentide ice sheet from western Canada using luminescence ages from postglacial aeolian dunes. Kennedy Munyikwa et al. en *Quaternary Geochronology*, vol. 6, n.º 4, págs. 407-422, junio de 2011.

BUSCANDO

La misión Mars Phoenix reavivó las esperanzas sobre la habitabilidad del planeta rojo. El Laboratorio Científico para Marte, lanzado por la NASA hace poco más de un mes, intentará zanjar la cuestión

Peter H. Smith

En esta panorámica parcial del área de aterrizaje de la sonda *Phoenix* se observa una de las dos baterías de paneles solares. Por detrás se extiende un terreno de patrones poligonales, una característica del permafrost tanto marciano como terrestre. (Vista completa disponible en photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA13804)

VIDA EN MARTE



Peter H. Smith es catedrático de ciencias planetarias en la Universidad de Arizona. Ha participado en algunas de las misiones de exploración espacial más exitosas de la NASA, organización que en 2010 le concedió la Medalla al Mérito Científico Excepcional.



El pasado mes de noviembre, la NASA envió hacia el planeta rojo su última y más avanzada misión: el Laboratorio Científico para Marte (MSL, por sus siglas en inglés). Se prevé que la sonda aterrice el próximo mes de agosto en el cráter de Gale, donde el vehículo explorador *Curiosity* recorrerá uno de los depósitos con mayor abundancia de arcillas y sulfatos del planeta: los vestigios de un pasado rico en agua en el que los ríos excavaban valles.

Del tamaño de un coche pequeño, *Curiosity* explorará durante un año marciano (unos 690 días terrestres) la base del pico central del cráter, considerada la zona más antigua. Tras ello, si la NASA decide prolongar la misión, *Curiosity* comenzará a escalar la montaña de derrubios, de cinco kilómetros de altura. A medida que ascienda, avanzará en el tiempo geológico hacia depósitos más modernos, mientras examina capas de minerales que se formaron en presencia de agua. Un brazo robótico permitirá tomar muestras y volcarlas en un laboratorio químico a través de un puerto de acceso situado en la parte superior del vehículo. En su interior, los analizadores determinarán la estructura y composición de los minerales. Los instrumentos a bordo, diseñados para detectar materia orgánica, tratarán de dilucidar si, en el pasado, se dieron en Marte las condiciones necesarias para albergar vida.

El MSL supone la continuación lógica de las investigaciones que sobre el planeta vecino se han venido realizando durante los últimos quince años. Su diseño se basa en los hallazgos de los robots exploradores *Sojourner*, *Spirit* y *Opportunity*, así como en los de la última misión, Mars Phoenix. Todos ellos han revelado la existencia de un mundo complejo y con una enrevesada historia geológica, que incluye un pasado en el que existían lagos y caían lluvias [*véase* «Agua en Marte», por Jim Bell; Investigación y Ciencia, febrero de 2007]. Hoy, a pesar de tratarse de un planeta seco y congelado, Marte muestra signos de actividad. Entre los descubrimientos más fascinantes destacan los que apuntan a la presencia de metano sobre la región de Nili Fossae. Los planetólogos se debaten sobre si el gas —en caso de que exista— posee un origen geológico o biológico [*véase* «El metano en Marte y Titán», por Sushil K. Atreya; Investigación y Ciencia, julio de 2007]. El año pasado, la sonda orbital *Mars Reconnaissance* detectó vetas superficiales cuyo origen admitía una explicación sencilla en términos de la liberación estacional de agua salobre.

Sin embargo, frente a todos estos hallazgos contrastan las contundentes conclusiones que las sondas gemelas *Viking* extrajeron en 1976: una hostilidad excepcional del planeta rojo para hospedar cualquier forma de vida. Según aquellos resultados, el suelo no contenía agua, moléculas orgánicas ni microorganismos en estado de hibernación. La presencia de oxidantes muy fuertes, como el peróxido de hidrógeno, y una intensa radiación ultravioleta esterilizaban la superficie. Para un gran número de expertos, la búsqueda de vida en Marte comenzó y concluyó con la misión Viking.

¿Cómo puede reconciliarse una conclusión tan desoladora con las innegables maravillas que exhibe el planeta? La respuesta podría hallarse en los resultados de la misión Mars Phoenix. Sus experimentos químicos sobre el suelo marciano, los primeros desde la misión Viking, dieron pie a una interpretación alternativa a los resultados nulos de las sondas gemelas: tal vez estas no detectaron moléculas orgánicas porque las técnicas de

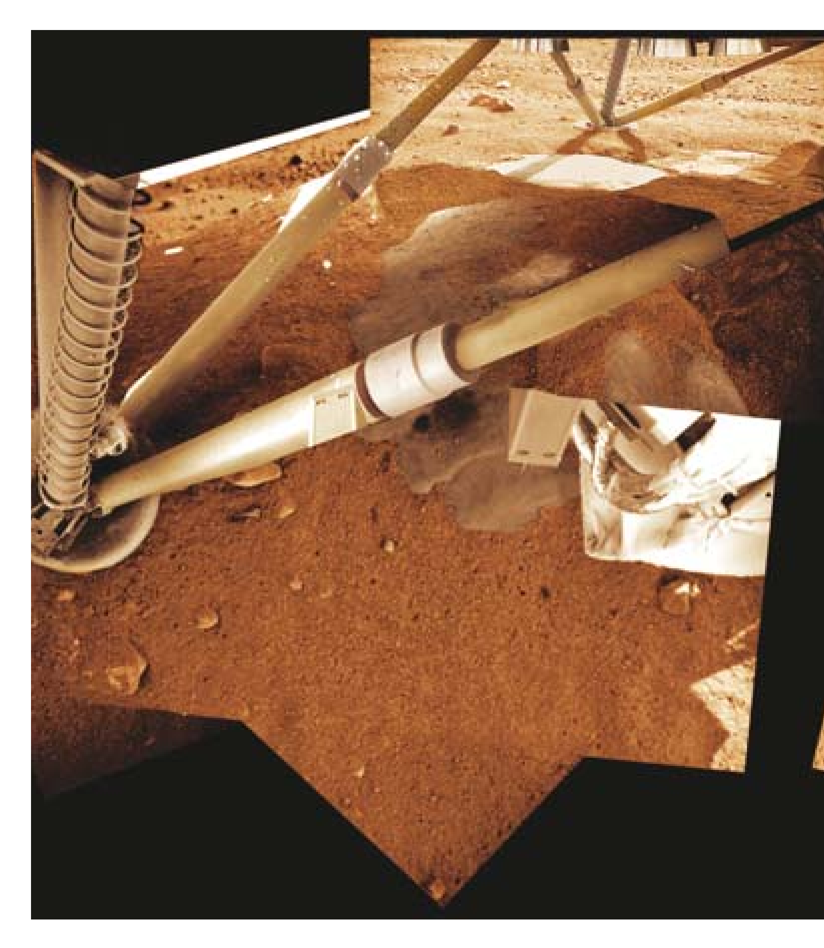
EN SÍNTESIS

Tras dos años de retraso, el Laboratorio Científico para Marte (MSL) partió el pasado mes de noviembre. Con el instrumental más avanzado que jamás haya sido enviado a Marte, estudiará la idoneidad del planeta rojo para albergar vida microscópica.

En parte, las razones para lanzar el MSL se deben a los resultados de la misión Mars Phoenix. En 2008, dicha misión descubrió que el suelo marciano quizá no fuese tan hostil hacia la vida como en 1976 hicieron creer las sondas *Viking*.

La misión Phoenix halló hielo de agua próximo a la superficie y carbonato cálcico, sustancias de cuya existencia se sospechaba pero que nunca se habían observado. La sonda descubrió, además, materiales inesperados, como percloratos y copos de nieve.

Una semana después del aterrizaje, ***Phoenix*** **observó el suelo bajo sus pies y detectó unas manchas lisas y blancas. Probablemente, hielo de agua que quedó expuesto cuando los motores de aterrizaje levantaron el polvo. (La imagen en primer plano se encuentra distorsionada;** ***Phoenix*** **se halla casi al nivel del suelo.)**



CORTESÍA DE KENNETH KREMER Y MARCO DI LORENZO NASA/JPL/UA/INSTITUTO MAX PLANCK

análisis las destruyeron de forma inadvertida. Por otro lado, la misión Mars Phoenix descubrió hielo próximo a la superficie, un hecho que los planetólogos habían planteado como hipótesis pero que nunca habían llegado a observar. No tan seco ni tan yermo, puede que las condiciones de nuestro planeta vecino permitan la existencia de vida.

Ahora, mientras continúan asumiéndose las posibles implicaciones de las misiones pasadas y cuando se acaba de enviar una nueva, es un buen momento para recordar la aventura técnica y emocional que supone planificar una misión interplanetaria.

EL RENACER DEL AVE

No sucede a menudo que alguien llame por teléfono para ofrecer una nave espacial gratuita. Sin embargo, eso fue lo que hicieron los expertos del Centro de Investigación Ames de la NASA a comienzos de 2002. Me explicaron que en una sala de la compañía Lockheed Martin, en Denver, había una caja de unos tres metros que contenía una polvorienta nave espacial *Surveyor*. Debía haberse lanzado en 2001, pero la NASA suspendió la misión después de perder la señal de su gemela, la sonda *Mars Polar Lander*, durante el aterrizaje, en diciembre de 1999. Aquel accidente supuso un duro golpe para la agencia, que aún estaba recuperándose de la desaparición, unas semanas atrás, de la sonda orbital *Mars Climate* durante la maniobra de inserción en órbita. Y también para mí, pues había dirigido el diseño y la construcción de la cámara de la sonda de aterrizaje.

Los científicos del Centro Ames pretendían reciclar la nave como parte del nuevo programa Scout de la NASA, por lo que solicitaron mi participación como científico jefe. Asombrado por la petición, tuve algunas dudas. Después de doce años de colaboración en exploraciones planetarias, los continuos viajes, las reuniones interminables y las incesantes llamadas telefónicas habían perdido toda su emoción y me habían apartado de la investigación científica para la que me había formado.

Por si fuera poco, a escasos meses de la fecha de entrega de la propuesta, el nuevo proyecto aún carecía de financiación y no contaba ni con un gestor ni con el respaldo de una institución importante. A pesar de todo, sentí el deseo de dirigir un grupo de trabajo que intentase resolver los intrincados entresijos de la ciencia marciana. En el fondo, nunca creí del todo los resultados de las sondas *Viking*. ¿Cómo es posible que no encontrasen materia orgánica? ¿Podría esta hallarse en algún otro lugar, accesible a una nueva misión diseñada de la manera adecuada?

Me debatí durante dos semanas. Debía encontrar objetivos científicos relevantes. La nave *Surveyor* había sido diseñada para aterrizar cerca del ecuador, tomar muestras del suelo con un brazo robótico y emplear un vehículo explorador para analizar las rocas circundantes. También llevaba a bordo el instrumental necesario para preparar una futura misión tripulada. El presupuesto del programa Scout no nos permitía transportar el vehículo explorador y, además, no pretendíamos preparar ninguna exploración humana. Los antiguos instrumentos podrían reemplazarse por otros nuevos, pero la elección dependía de nuestros objetivos científicos, aún por definir.

Entonces, una maravillosa coincidencia quiso que mi compañero William Boynton hiciese público el descubrimiento de hielo bajo la superficie del planeta, en una región próxima al Polo Sur. Boynton dirigía el equipo encargado de la construcción y el manejo del espectrómetro de rayos gamma de la sonda orbital *Mars Odyssey*. El instrumento no solo detectaba rayos gamma, sino también neutrones, los cuales permiten medir la concentración de hidrógeno en el suelo hasta un metro de profundidad. Su investigación halló, además, pruebas indirectas de la existencia de agua en las planicies septentrionales. Entre ellas se incluía una extensión de terreno localizada sobre la frontera que la capa de dióxido de carbono congelado alcanza en invierno (dicha capa se expande y se contrae con los ciclos estacionales). Hice una cruz en mi mapa sobre aquel punto y comencé a escoger los instrumentos para indagar el fenómeno.

En la Tierra existe una región similar de permafrost alrededor del Ártico; actúa como un congelador en el que se preservan los restos de seres vivos que habitaron la Tierra en el pasado. La antigüedad de ese hielo puede alcanzar los cientos de miles de años. En una conferencia sobre las regiones polares de Marte, escuché que Eske Willerslev, de la Universidad de Copenhague, había analizado muestras de ADN obtenidas en el hielo glaciar de Groenlandia y en el permafrost de Siberia. Había hallado una gran diversidad de plantas, animales y otros organismos. ¿Sería posible encontrar algo similar en Marte, con un hielo que quizá contase con varios millones de años de antigüedad?

Nació así una colaboración entre la Universidad de Arizona, el Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA (JPL, por sus siglas en inglés) y la compañía Lockheed Martin. Bautizamos

nuestra misión con el nombre de Mars Phoenix, en referencia al ave mitológica, puesto que estábamos resucitando a la cancelada *Surveyor*. De esta manera, comenzó un año y medio de frenética redacción de proyectos y de competición con otras 20 misiones, el cual culminó con una visita de ocho horas del comité de evaluación de la NASA. En agosto de 2003, la agencia seleccionó nuestro proyecto como la primera misión Scout a Marte. La fecha de lanzamiento, en 2007, nos concedía cuatro años de preparativos.

UN RADAR PROBLEMÁTICO

Al desempaquetarla, la nave mostraba el aspecto de una mariposa gigante: su cuerpo exhibía todo tipo de instrumentos y sus dos amplios paneles solares parecían dos alas abiertas. Se agazapaba sobre tres patas y su único apéndice, el brazo robótico, asomaba por un lateral.

Durante los cuatro años siguientes inspeccionamos, rediseñamos y comprobamos el equipo para detectar los fallos que habían hecho fracasar a su nave gemela. En total, los ingenieros de Lockheed Martin y del JPL detectaron cerca de 25 anomalías. A pesar del arduo trabajo que supuso identificar las deficiencias, el proceso resultaba más fácil y barato que construir otra nave, lo que hubiera conllevado sus propios riesgos. La mayor parte de los fallos admitían soluciones sencillas: instalación de radiadores, reducción del tamaño del paracaídas o refuerzo de la estructura. Otros problemas requerían mejorar los programas informáticos. Sin embargo, uno de los defectos no resultó tan fácil de entender ni corregir.

El radar de aterrizaje se había extraído de un bombardero F-16 de finales de la década de los noventa. Al realizar ensayos de descenso en el desierto de Mojave, en EE.UU., el sistema cometía errores clave en los datos de altura y perdía datos en momentos inoportunos. Consultamos con la empresa Honeywell, constructora del radar, a fin de entender su funcionamiento interno. A pesar de la buena voluntad de la compañía, el modelo se hallaba obsoleto y no disponían de asistencia técnica. Los responsables ya no trabajaban en la empresa y los registros que esta conservaba no gozaban del detalle suficiente.

Formamos un equipo con ingenieros de Lockheed Martin, el JPL, Honeywell y el Centro de Investigación Langley de la NASA. Las simulaciones por ordenador y otras verificaciones nos permitieron solucionar poco a poco las deficiencias. En octubre de 2006 realizamos un ensayo que concluyó con éxito. Todo parecía arreglado.

Pero nuestras esperanzas volvieron a truncarse. Descubrimos que los reflejos procedentes del escudo térmico, una vez desprendido, podían confundir al radar e introducir errores graves en el cálculo de la altitud. Las antenas y los interruptores también parecían propensos a provocar fallos. Los problemas se antojaban interminables. En febrero de 2007, a tan solo cinco meses de la fecha en la que debíamos instalar la nave en el cohete lanzador, debíamos revisar aún 65 anomalías.

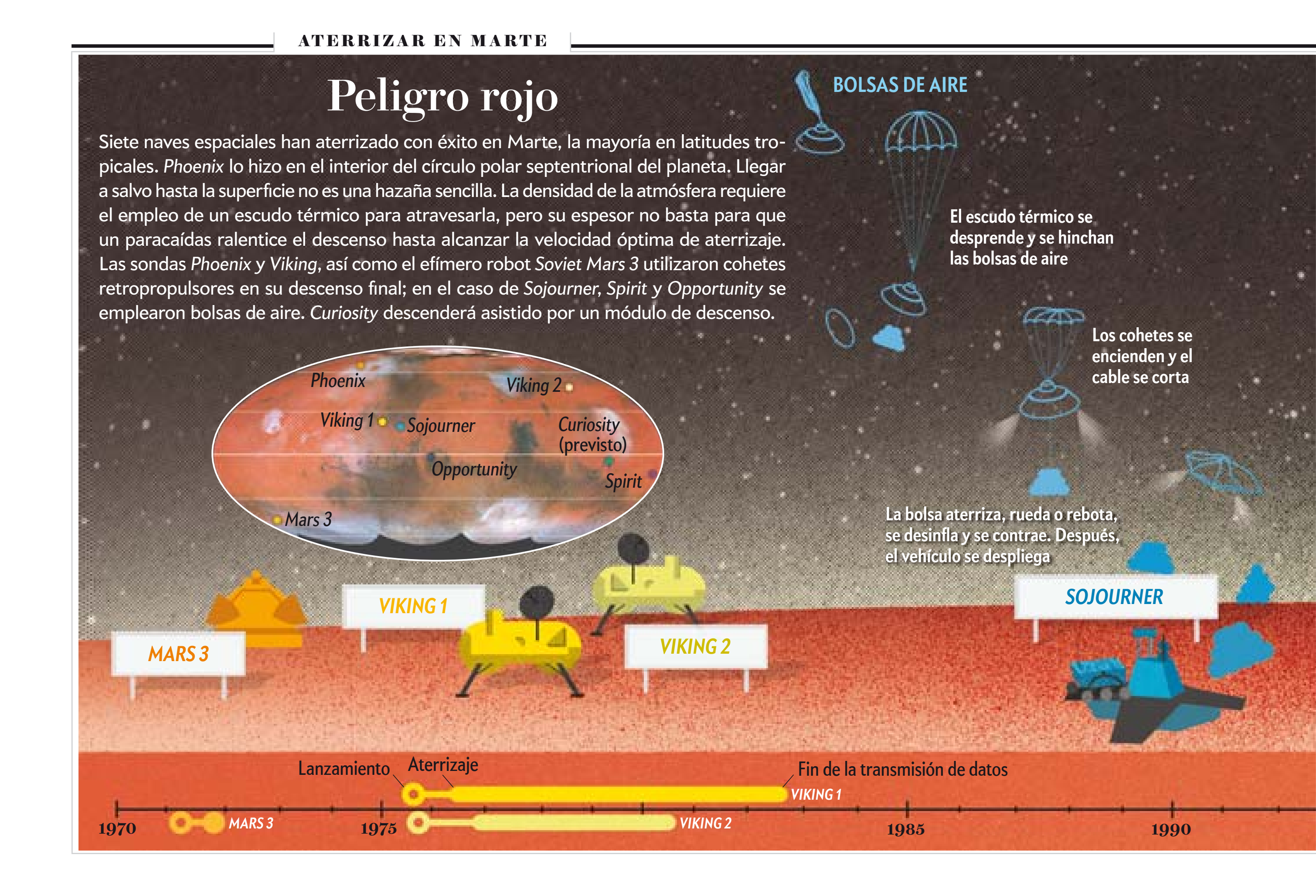
En ausencia de un radar fiable, el lanzamiento quedaba en duda. El comité evaluador de la NASA seguía de cerca nuestra situación y manifestaba su preocupación por la constante aparición de deficiencias. Por otra parte, la gravedad de las anoma-

STEVE LEE, UNIVERSIDAD DE COLORADO; JIM BELL, UNIVERSIDAD CORNELL; MIKE WOLFF, INSTITUTO DE CIENCIAS ESPACIALES Y NASA (*mapa base de Marte*); GAVIN POTENZA (*ilustración*)

ATERRIZAR EN MARTE

Peligro rojo

Siete naves espaciales han aterrizado con éxito en Marte, la mayoría en latitudes tropicales. *Phoenix* lo hizo en el interior del círculo polar septentrional del planeta. Llegar a salvo hasta la superficie no es una hazaña sencilla. La densidad de la atmósfera requiere el empleo de un escudo térmico para atravesarla, pero su espesor no basta para que un paracaídas ralentice el descenso hasta alcanzar la velocidad óptima de aterrizaje. Las sondas *Phoenix* y *Viking*, así como el efímero robot *Soviet Mars 3* utilizaron cohetes retropropulsores en su descenso final; en el caso de *Sojourner*, *Spirit* y *Opportunity* se emplearon bolsas de aire. *Curiosity* descenderá asistido por un módulo de descenso.



días disminuía. En junio convencimos al comité y a los gestores de la NASA de que los riesgos que persistían eran admisibles. Aun así, se trataba de una apuesta fuerte: en vista de que poco antes del lanzamiento continuábamos detectando fallos, bien podían esconderse otros.

FÉNIX EN EL CIELO

En agosto de 2007 concluimos las últimas verificaciones en el Centro Espacial Kennedy, tras lo cual preparamos la instalación de la nave en el cohete de lanzamiento Delta II. Entonces viví una experiencia que desearía olvidar. Mientras la grúa levantaba la nave hacia la parte superior del cohete, de casi 40 metros de altura, se desató una gran tormenta eléctrica. Las normativas de seguridad obligaban a evacuar la torre de montaje, de modo que la sonda, con sus delicados instrumentos electrónicos apenas protegidos, quedó colgada a 18 metros del suelo en medio de una tempestad de verano. Tras la tormenta, trasladamos de nuevo la sonda hasta el edificio de montaje para comprobar si se había producido algún daño. Como si de un milagro se tratase, no encontramos ninguno.

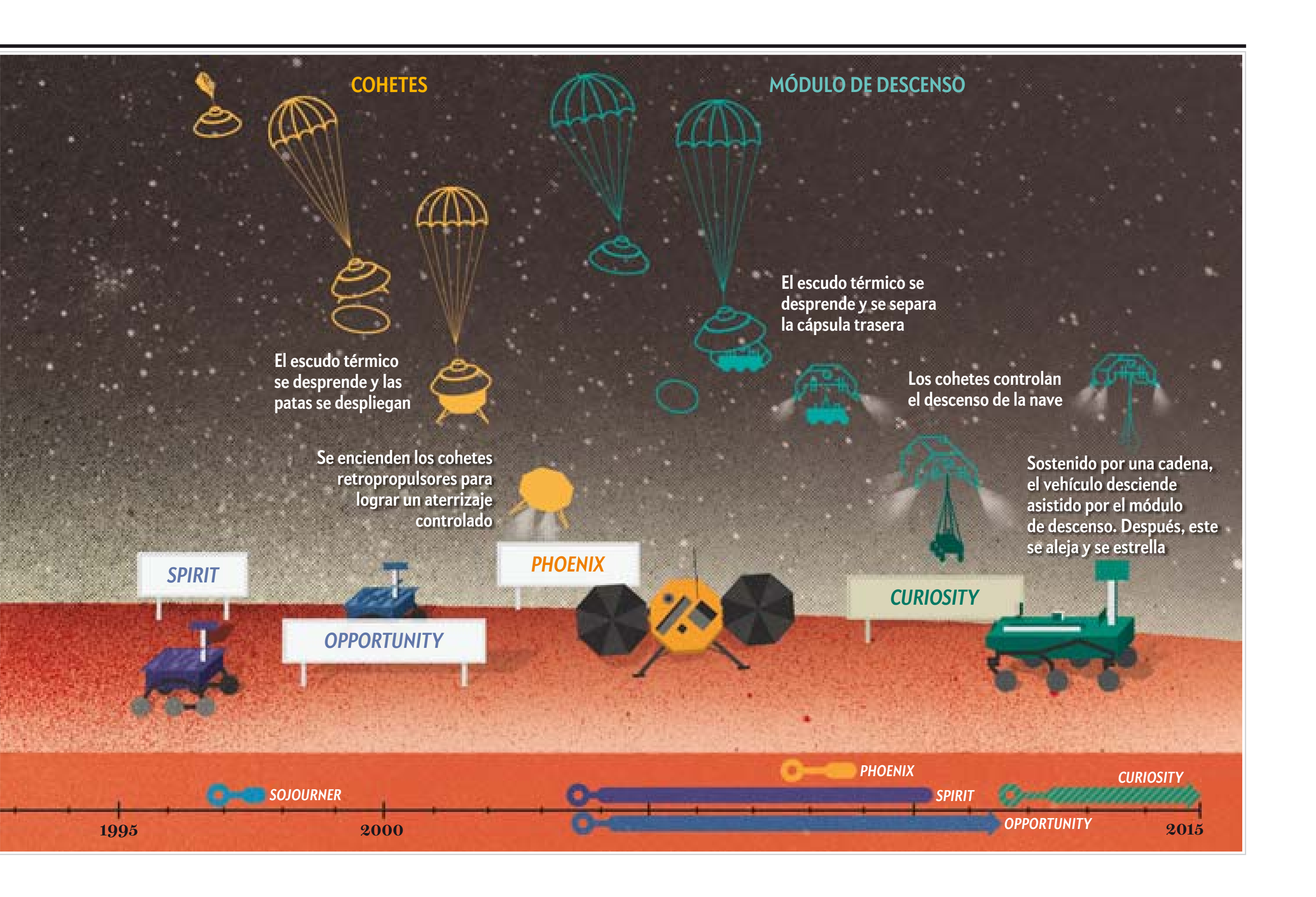
La cuenta atrás comenzó en la madrugada del 4 de agosto. Salí de la sala de control para contemplar el lanzamiento con mis propios ojos. Eran las 5:15 y el cielo rebosaba de estrellas. Marte brillaba al este. De pronto, los edificios se iluminaron como si estuviera amaneciendo. Medio minuto después llegaba hasta mí el sonido del lanzamiento, que comprimió mi pecho debido a la onda expansiva generada por la explosión del despegue. Los seis cohetes de combustible sólido se desprendieron y cayeron como destellos en el Atlántico, mientras los tres restantes se encendían. *Phoenix* se había puesto en camino.

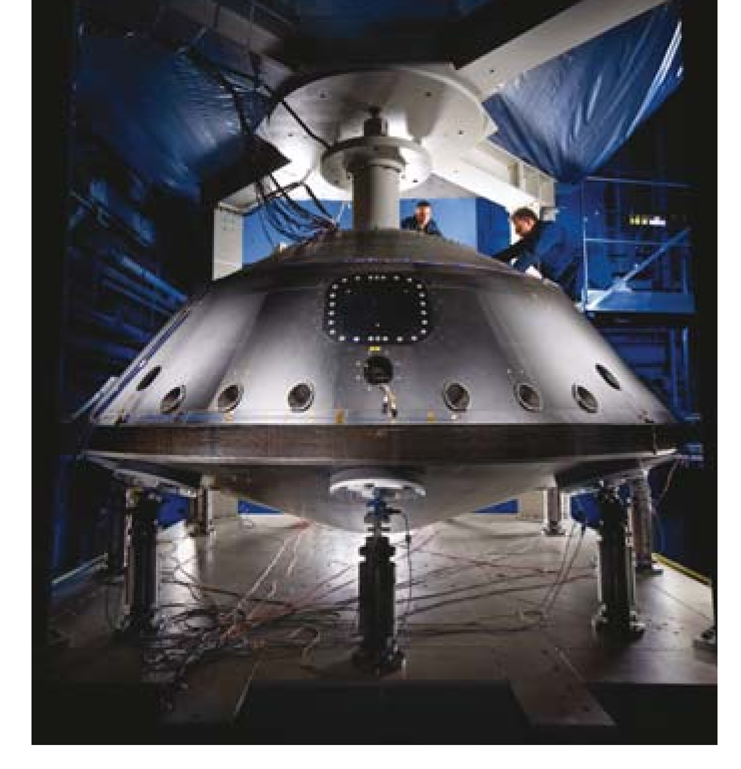
A escasos meses del lanzamiento, el radar fallaba durante las simulaciones de descenso y el fabricante ya no ofrecía asistencia técnica

El lanzamiento se efectúo en dos minutos; después, solo quedaba en el cielo nocturno la estela de vapor. Regresamos a la sala de control para comer algo y tomar café. Luego salí a dar un paseo para contemplar el amanecer. Algo inusual había ocurrido en el cielo. El vapor dejado por los cohetes se había arremolinado por acción de los vientos estratosféricos y aparecía iluminado por el sol del amanecer. La visión me sobrecogió: mostraba exactamente la forma de un ave Fénix. Podía distinguir el pico, las alas y una larga cola que se curvaba por detrás y que asomaba como un látigo por encima de la cabeza, como en algunas pinturas chinas. Nunca me había sorprendido tanto la forma de una nube. ¿Podía tratarse de un buen presagio que auguraba el éxito de nuestro viaje a Marte?

UN ATERRIZAJE ANGUSTIOSO

Al cabo de diez meses, los ingenieros del JPL y Lockheed Martin se preparaban para efectuar las complejas maniobras de aterrizaje. Tras haber recorrido 600 millones de kilómetros, la





La cápsula espacial de la misión MSL, cuyo lanzamiento tuvo lugar en noviembre, está dotada de un escudo térmico atmosférico mayor que el de las sondas *Apolo*.

sonda comenzaba a percibir el campo gravitatorio de Marte. La sucesión de los acontecimientos se había calculado al segundo. Los orbitadores *Odyssey* y *Mars Reconaissance* habían ajustado sus órbitas, coordinados para sobrevolar el descenso y transmitir las señales de *Phoenix* en tiempo real (con un retraso de 15 minutos, tiempo en que tarda la luz en llegar a la Tierra).

Aterrizar en Marte resulta mucho más complejo que hacerlo en la Luna o en la Tierra [*véase* «Otros desafíos en los viajes tripulados a Marte», por Eduardo García Llama; Investigación y Ciencia, diciembre de 2011]. La nave debe llevar a cabo cinco transformaciones. La primera consiste en la fase de crucero interplanetario, tras la cual la sonda adopta una configuración más aerodinámica y se convierte en un vehículo de reentrada capaz de soportar el calor que se genera al penetrar en una atmósfera a casi 20.000 kilómetros por hora. Tras decelerarse hasta los 1500 km/h, despliega su paracaídas del escudo posterior. En la tenue atmósfera marciana, el paracaídas solo permite reducir la velocidad hasta los 150 km/h, demasiado rápido como para llevar a cabo un aterrizaje seguro. Cuando se encuentra a un kilómetro de la superficie, la sonda de aterrizaje se desprende del paracaídas y del escudo protector posterior y se precipita en caída libre. Doce cohetes retropropulsores la deceleran hasta alcanzar una velocidad final equivalente a un paseo rápido, tras lo cual se posa en la superficie. El golpe del aterrizaje es amortiguado por puntales diseñados para ese fin. Por último, la sonda debe desplegar con éxito sus paneles solares e instrumentos, y prepararse para su misión en superficie. Todas estas transformaciones tienen lugar en siete minutos.

Desde la sala de control del edificio 230 del JPL, mantuve la respiración cuando la sonda se situaba a un kilómetro de altura por encima de la superficie marciana. La tensión en la sala aumentaba mientras recordábamos los problemas con el radar y la pérdida de la sonda *Mars Polar Lander*. Los cohetes debían reducir la velocidad de descenso hasta unos 10 kilómetros por hora, disminuir la velocidad lateral a menos de un metro por segundo y mantener la cubierta del aterrizador paralela a la superficie. En las reuniones de preparación, Joe Guinn, gestor de la misión, bromeaba diciendo que, si fallaba uno de los cohetes, los otros once nos conducirían con seguridad hacia el lugar del accidente.

Uno de nuestros ingenieros leía la telemetría del radar conforme la distancia a la superficie disminuía: 1000 metros, 800, 600... Se aproximaba demasiado rápido, pensé; el aterrizaje no sería seguro a esa velocidad. La sonda atravesó la barrera de los 100 metros y todo cambió. ¡Habíamos alcanzado la velocidad de aterrizaje! Pronto recibimos la primera señal desde la superficie y la sala estalló en júbilo.

Las dos horas que transcurrieron mientras esperábamos que *Odyssey* orbitara Marte y volviera a sobrevolar la sonda parecieron interminables. Por fin, confirmamos que *Phoenix* había abierto con éxito los paneles solares y había tomado sus primeras imágenes. Nuestra primera visión del círculo polar septentrional marciano resultó mágica. Formas poligonales y rocas diminutas se prolongaban hasta el horizonte. Tras seis años de preparación, estábamos en condiciones de comenzar nuestra labor científica.

UN SUELO APELMAZADO

Nuestro grupo, formado por 35 científicos, 50 ingenieros y 20 estudiantes, comenzó a trabajar día y noche. Por motivos de eficiencia, el equipo relevaba dos veces cada 24 horas y 40 minutos, la duración de un día solar en Marte. Poco a poco, nos fuimos adaptando al día marciano, denominado *sol*, y comenzamos a perder la referencia con el terrestre. Nos adentramos en un *jet lag* perpetuo.

Nuestra primera gran sorpresa llegó incluso antes de que el brazo robótico excavase la primera zanja. Para comprobar la posición de la pata trasera, orientamos el brazo en el ángulo adecuado para observar lo que yacía bajo la sonda. Los cohetes retropropulsores habían barrido unos cinco centímetros de suelo seco y habían dejado al descubierto unos fragmentos brillantes: quizá fuese hielo. El brazo no se bastaba para alcanzarlos, pero la imagen sirvió para aumentar nuestras expectativas respecto a lo que podíamos encontrar.

A medida que el brazo excavaba, vimos cómo se desenterraba una capa brillante cuyos fragmentos, según comprobamos después, desaparecían al cabo de tres o cuatro soles. Aunque parecía tratarse de hielo de agua que se sublimaba, debíamos esperar a los resultados del Analizador Térmico y de Gases Evolucionados (TEGA). A una temperatura ambiente de 30 grados centígrados bajo cero, el dióxido de carbono congelado se habría sublimado con mayor rapidez. En efecto, el TEGA confirmó nuestras sospechas: por primera vez, se confirmaba la existencia de hielo de agua bajo la superficie de Marte, lo que validaba las observaciones de *Odyssey*.

Una vez que la capa de hielo había quedado expuesta, entendí que el paisaje que rodeaba a la sonda (y, quizás, a ambas regiones polares) no era una llanura seca y desértica, sino una extensión de hielo de profundidad desconocida. Con el fin de determinar si el hielo se había fundido alguna vez, la sonda llevaba a bordo tres instrumentos de análisis: el TEGA, que constaba de ocho hornos diminutos conectados a un espectrómetro de masas para determinar la composición de los gases que se liberan de una muestra sólida; el Laboratorio de Química Húmeda (o WCL, por sus siglas en inglés), que añadía agua (terrestre) a una muestra de suelo y analizaba los iones que se

disolvían en ella, y un microscopio. Esperábamos obtener resultados coherentes entre las medidas del TEGA y el WCL, ya que ambos instrumentos analizaban la mineralogía y la química del suelo de forma independiente.

Nuestro objetivo prioritario consistía en estudiar la química del suelo en busca de indicios de agua líquida, así como de nutrientes y fuentes de energía para organismos potenciales. Por otro lado, pretendíamos determinar la estructura vertical del terreno, desde las capas más superficiales hasta la interfase hielo-suelo. El brazo debía tomar muestras y colocarlas en los puertos de acceso al analizador, situados en la cubierta de la sonda. La operación resultaba tan sencilla como volcar arena en un cubo. Sin embargo, efectuarla a 300 millones de kilómetros de distancia la convertía en un reto. Para practicar, en una sala de pruebas de nuestro centro de operaciones en Tucson contábamos con réplicas del brazo robótico, cámaras y puertos de recogida de muestras. Habíamos verificado todas las funciones antes del lanzamiento, aunque no podíamos reproducir ni los vientos ni las propiedades del suelo marciano.

El suelo de Marte mostraba un aspecto encostrado, a diferencia de los materiales sueltos del terreno de Arizona, donde habíamos realizado las simulaciones. En consecuencia, la pala excavadora en el extremo del brazo robótico recogía fragmentos apelmazados. La función de los tamices de acceso al analizador consistía en evitar la entrada de guijarros, pero, además, demostraron su eficacia a la hora de desmenuzar los bloques que tomábamos del suelo. El brazo colocó con éxito su primera muestra sobre el tamiz de acceso al TEGA, pero ningún grano consiguió disgregarse y atravesarlo para introducirse en el horno y ser analizado. Un dispositivo integrado en el instrumento permitía hacer vibrar el tamiz, pero nos llevó cuatro soles conseguir que cayera suficiente material en el horno. Mientras tanto, toda el agua que pudiera estar adherida se sublimaba.

Con el tiempo fuimos descubriendo mejores estrategias para tomar fragmentos. Analizamos muestras localizadas a distintas profundidades y en diferentes puntos del área de excavación. Aun así, muchas no alcanzaron los puertos de acceso al analizador, pues el viento las desplazaba hacia el lateral e impedía que cayeran en el instrumento.

Mientras aprendíamos la mejor manera de excavar en Marte, los sensores atmosféricos tomaban datos meteorológicos. La Agencia Espacial Canadiense había participado en la misión con un sistema de teledetección por láser (LIDAR) que permitía estudiar el polvo atmosférico, así como la profundidad de las nieblas bajas y la altura de las nubes formadas por cristales de hielo de agua. El instrumento también registraba la temperatura superficial y la presión. En resumen, nuestras posibilidades de inspección abarcaban desde la superficie de la capa de hielo hasta la tropopausa, mientras los orbitadores observaban la región desde las alturas para contextualizar todos los datos.

APTO PARA EL CULTIVO

Una de las mayores sorpresas fue el descubrimiento de dos componentes inesperados: carbonato cálcico (en una concentración del 5 por ciento) y perclorato (0,5 por ciento). Ambos resultaban fundamentales en nuestra búsqueda de vida.

El carbonato cálcico se forma cuando el dióxido de carbono se disuelve en agua líquida y produce ácido carbónico. El ácido lixivia el calcio del suelo y forma el carbonato, un mineral muy frecuente en la Tierra, denominado caliza o creta en ambientes naturales. En nuestra vida cotidiana lo consumimos para aliviar la acidez de estómago. El WCL calculó un *p*H de 7,7, ligeramente alcalino y casi idéntico al del agua de mar terrestre.

Los planetólogos han buscado carbonatos en Marte durante décadas. La presencia de un gran número de cañones, morfologías fluviales y antiguos lechos lacustres constituyen pruebas de que Marte fue una vez un planeta húmedo, lo que a su vez pudo dotarlo de una atmósfera de mayor espesor. El dióxido de carbono debía haber acabado a alguna parte, y las rocas de carbonato cálcico constituían las principales candidatas. La misión Phoenix demostró, por primera vez, que el suelo marciano contaba con dichas rocas. Desde entonces, las sondas orbitales han detectado afloramientos aislados de rocas de carbonato cálcico, si bien otros carbonatos parecen abundar más.

Al margen del propio interés del descubrimiento, el carbonato cálcico aportaba nuevas pruebas de que aquel suelo había sido húmedo en un pasado reciente. Su existencia podría también explicar el apelmazamiento y la sequedad del suelo, ya que dicho mineral actúa a modo de cemento.

El suelo alcalino del lugar de aterrizaje de *Phoenix* difiere considerablemente del observado por otras sondas. Su *p*H es similar al de los mares terrestres

El suelo alcalino del lugar en el que aterrizó la sonda *Phoenix* difería en gran medida de lo observado en otras ocasiones: habría bastado con añadir agua y aumentar la presión atmosférica para poder cultivar espárragos en aquella zona. Por el contrario, el robot *Opportunity* había recorrido suelos antiguos muy ácidos y con un alto contenido en sulfatos, productos de un régimen químico pasado muy hostil para la vida.

En cuanto al perclorato, en la Tierra este compuesto se manufactura en forma de perclorato amónico para emplearlo como oxidante en el combustible sólido para cohetes (incluidos los nueve cohetes integrados del Delta II que lanzó la sonda *Phoenix* al espacio). Disuelto en agua, el perclorato se considera tóxico cuando su concentración supera las 0,025 partes por millón. Pero lo que resulta tóxico para las personas puede ser maná para los microorganismos. Los procesos naturales producen una pequeña cantidad de perclorato, el cual puede acumularse en ausencia de agua que lo transfiera hacia otros lugares. En el desierto de Atacama, en Chile, llueve una vez cada diez años, lo que facilita la acumulación de percloratos. Allí, algunas bacterias subsisten gracias a que emplean dicho compuesto y ciertos nitratos como fuentes de energía. ¿Podría ocurrir algo así en Marte?

Con el objetivo de estudiar las variaciones en el clima marciano durante los últimos diez millones de años, los modelos más recientes han incorporado la dinámica orbital de Marte y las amplias oscilaciones en la oblicuidad del planeta (el ángulo entre el plano de la órbita y el eje de rotación, equivalente a la inclinación de la eclíptica terrestre), que hoy en día asciende a 25 grados. La intensidad de la radiación solar en los polos experimenta variaciones considerables, desde el frío período actual hasta largas temporadas más cálidas. En verano, las temperaturas superan el punto de sublimación de la capa de hielo. Este desaparece de los polos y vuelve a formarse en las cimas

de los grandes volcanes cercanos al ecuador, donde aparecen extensos glaciares. Al mismo tiempo, los polos se vuelven templados. Tal vez el carbonato cálcico se formó durante aquellos períodos más cálidos y húmedos.

Una de nuestras observaciones demostró cómo podría funcionar un ecosistema microbiano. Una madrugada, cuando el verano marciano tocaba su fin y los rayos solares incidían más oblicuos, el sistema LIDAR detectó nieve que caía alrededor de la nave. El vapor procedente de la evaporación de la nieve puede recubrir los granos de polvo según un proceso de adsorción. El agua adsorbida actúa como una delgada película de líquido. Durante un periodo cálido, dicha película puede aumentar su grosor hasta interconectarse entre los distintos granos y crear así un «mar» microscópico, con capacidad de alojar microorganismos. Los nutrientes y oxidantes detectados por *Phoenix* podían facilitar la supervivencia de los seres que se nutrieran de percloratos. Aun así, necesitarían hibernar durante varios millones de años para resistir los periodos fríos y secos. Por otra parte, el perclorato presenta una propiedad fundamental: a concentraciones elevadas, puede reducir el punto de congelación del agua hasta los 70 grados Celsius bajo cero. De este modo, los microorganismos podrían encontrar su nicho en Marte aun cuando el clima se volviera más frío.

¿UN POLO HABITABLE?

La existencia de perclorato podía, además, resolver un misterio que ha perdurado a lo largo de 35 años. Cuando las sondas *Viking* analizaron el suelo y calentaron las muestras, detectaron emisiones de clorometanos. Entonces, los responsables de la misión no lograron atribuirles un origen marciano, así que dieron por sentado que provenían de algún agente de limpieza aplicado antes del lanzamiento. Los mismos análisis no detectaron ningún material orgánico nativo.

El perclorato sugiere una interpretación distinta. Unos investigadores de la Universidad Autónoma Nacional de México y sus colaboradores volvieron a realizar el mismo experimento con muestras del desierto de Atacama, similar al suelo marciano, con y sin pequeñas cantidades de perclorato. Con ello, reprodujeron la liberación de gases registrada por las *Viking*: el perclorato liberaba oxígeno, el cual causaba la combustión de la materia orgánica y, en el proceso, se emitían clorometanos. Por lo tanto, un suelo con percloratos podría haber contenido cantidades sustanciales de materia orgánica, más de una parte por millón, las cuales habrían eludido los análisis de las *Viking*. El instrumento TEGA respaldó esta interpretación al detectar que el suelo comenzaba a liberar dióxido de carbono cuando el horno superaba los 300 grados Celsius, un fenómeno que cabría esperar en el caso de que el perclorato estuviera oxidando la materia orgánica contenida en el suelo.

En resumen, lo único que podemos afirmar a partir de los datos de la misión Mars Phoenix es que las probabilidades de hallar vida en Marte nunca fueron mayores. Ahora corresponde al MSL buscar otros indicios de habitabilidad. Aunque los resultados de Phoenix no constituyan sino pruebas circunstanciales, los instrumentos del MSL permitirán detectar compuestos orgánicos en el suelo sin necesidad de calentarlo. El método de análisis se basa en un proceso de derivatización, según el cual las muestras del suelo se agregan a una solución química, en la que las moléculas orgánicas se volatilizan y se detectan mediante un espectrómetro de masas.

La sonda *Phoenix* realizó una labor espectacular durante cinco meses, antes de que la oscuridad y las gélidas temperaturas del invierno polar marciano se cernieran sobre ella. En noviembre de 2008, perdimos su señal. El optimismo forma parte de la investigación científica, por lo que, cuando al año siguiente se acercaba la primavera al Polo Norte del planeta, mis colaboradores y yo aún albergábamos la esperanza de que el vehículo resucitara. No fue así. La última imagen del orbi-

ASTROBIOLOGÍA EXPERIMENTAL

LOS ASTRONAUTAS MÁS PEQUEÑOS

¿Cómo resisten algunas especies las duras condiciones del espacio?

DAVID WARMFLASH

¿Podría tener la vida en nuestro planeta un origen marciano? A lo largo de las dos últimas décadas, esta pregunta ha dejado de pertenecer a la ciencia ficción para convertirse en parte de la ciencia empírica.

Hoy sabemos que algunas rocas procedentes de Marte pueden llegar hasta la Tierra: se estima que, cada año, en torno a una tonelada de material marciano alcanza nuestro planeta. Aunque la eyección desde el planeta vecino obedece a sucesos muy violentos, algunos experimentos han demostrado que ciertas especies podrían haber sobrevivido. Por otra parte, cuando un meteoroide marciano atraviesa la atmósfera terrestre, solo se calientan los milímetros más próximos a su superficie, por lo que no todo microorganismo que se hallara en su interior tendría por qué incinerarse [*véase* «¿Vino de otro mundo la vida?», por David Warmflash y Benjamin Weiss; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2006].

En su caso, los organismos deberían haber sido capaces de sobrevivir a un viaje interplanetario en el interior de sus habitáculos rocosos. Los análisis orbitales indican que la mayoría de los meteoroides procedentes de Marte tardan miles de millones de años en alcanzar la Tierra, pero unos pocos (uno de cada diez millones) llegan en poco más de un año. ¿Podría un microorganismo mantenerse vivo durante ese tiempo?

El pasado 9 de noviembre, la Agencia Espacial Federal Rusa lanzó la sonda *Grunt* en dirección a Fobos, uno de los dos satélites de Marte. Llevaba a bordo una cápsula del tamaño de un balón de baloncesto cuyo propósito consistía en tomar muestras del suelo de la luna marciana y traerlas a la Tierra en 2014. Sin embargo, fallaron los propulsores y la nave no logró abandonar la órbita terrestre. [En el momento de escribir estas líneas la sonda se encuentra todavía allí. Se prevé que pronto reentrará en nuestra atmósfera.]

La cápsula extraviada alojaba el experimento LIFE (del inglés Living Interplanetary Flight Experiment): un pequeño contenedor diseñado por la Sociedad Planetaria que portaba organismos terrestres. En su centro se hallaba una muestra de suelo con una mezcla de microorganismos procedentes del desierto del Néguev, en Israel. Lo rodeaban 30 tubos pequeños con diez especies que representaban los tres dominios de la biología terrestre: bacterias, arqueobacterias y eucariontes. Cinco de ellas ya fueron enviadas en la misión final del trasbordador espacial *Endeavour*, en mayo del año pasado.

Nuestro equipo había seleccionado los organismos siguiendo dos criterios: bien porque se consideran los análogos terrestres de sus



Los tardígrados, también apodados «osos de agua», pueden resistir la radiación y las temperaturas extremas del espacio exterior.

PHOTO RESEARCHERS, INC.

supuestos antecesores marcianos, bien porque permitirían determinar la capacidad de resistencia de los microorganismos más tenaces.

BACTERIAS

Las bacterias, las arqueobacterias y los eucariontes conforman los tres dominios de la biología terrestre. Las primeras, que carecen de núcleo celular, se caracterizan por resistir las condiciones más extremas. *Deinococcus radiodurans*, por ejemplo, es conocido por su capacidad para sobrevivir aun cuando se bombardea su ADN con intensas dosis de radiación.

Aunque *D. radiodurans* tolera la radiación sin modificar su forma celular, otras bacterias se protegen de ella por medio de endosporas, unas estructuras endurecidas y muy resistentes. *Bacillus subtilis* posee una larga carrera como especie escogida para realizar vuelos espaciales. Gerda Horneck, del Centro Aeroespacial Alemán, ha experimentado con *B. subtilis* desde la década de los sesenta. Ha demostrado que sus endosporas pueden sobrevivir hasta seis años en el espacio sin más que una fina capa de polvo que las proteja de los rayos ultravioleta. No obstante, en el espacio interplanetario existe también la exposición a la radiación de partículas con carga eléctrica, más penetrantes.

Otro bacilo peculiar, *B. safensis*, fue descubierto hace unos diez años en las instalaciones del Laboratorio de Propulsión a Chorro de la NASA. Los técnicos se encontraban esterilizando la sonda orbital *Mars Odyssey* para evitar que el suelo del planeta rojo se contaminara con organismos terrestres que pudieran confundir futuras búsquedas de vida —o, peor aún, matar organismos nativos—, cuando los controles detectaron una especie que había sobrevivido a la esterilización.

ARQUEOBACTERIAS

Aunque las arqueobacterias también carecen de núcleo, guardan más similitudes bioquímicas con los eucariontes, por lo que conforman su propio dominio. *Methanothermobacter wolfeii* no solo se caracteriza por su gran resistencia, sino también por su capacidad para producir metano. Dado que la atmósfera marciana contiene trazas de este gas, algunos han postulado que su origen podría deberse a microorganismos similares a *M. wolfeii*.

Por otro lado, la arqueobacteria *Haloarcula marismortui*, autóctona del mar Muerto, presenta gran afinidad por la sal, tal y como se cree que debería ser el caso de los organismos marcianos: para evitar la congelación, el agua líquida del planeta rojo debería ser salobre. De hecho, un meteorito procedente de Marte, Nakhla, muestra huellas de haberse encontrado inmerso en salmuera en el pasado.

EUCARIONTES

Los eucariontes son organismos constituidos por células con núcleo, como las de nuestro cuerpo. En general, su capacidad para resistir condiciones extremas no es tan elevada como la de las bacterias o las arqueobacterias.

Con todo, algunos tardígrados (también llamados «osos de agua», pequeños invertebrados de unos 1,5 milímetros de longitud que presentan pequeñas patas con garras) pueden resistir de manera extraordinaria la radiación, las temperaturas extremas e incluso el vacío espacial. En lo que se refiere a las plantas, *Arabidopsis thaliana* es, al igual que *B. subtilis*, un organismo espacial veterano que ya ha viajado en dos ocasiones en cápsulas de la misión Apolo.

David Warmflash es astrobiólogo en la Universidad estatal de Portland.

tador mostraba a *Phoenix* al borde de una fractura alargada y semejante a un río. Con sus paneles solares rotos y enterrada en dióxido de carbono congelado, parecía formar un bordado de encaje con las rugosidades del terreno. Había dejado de ser una avanzadilla científica para pasar a formar parte del paisaje.

PARA SABER MÁS

H_2O at the Phoenix landing site. P. H. Smith et al. en *Science*, vol. 325, págs. 58-61, 3 de julio de 2009.

Habitability of the Phoenix landing site. C. R. Stroker et al. en *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, artículo n.º E00E20, 16 de junio de 2010.

Martian dummer: Robot arms, cowboy spacemen, and my 90 days with the Phoenix Mars Mission. Andrew Kessler. Pegasus, 2011.

Julieta Benítez Malvido es investigadora del Centro de Investigaciones en Ecosistemas de la Universidad Nacional Autónoma de México. Lleva más de diez años estudiando la ecología de la regeneración de bosques tropicales alterados por actividades humanas, sobre todo, en México y el Amazonas brasileño.



ECOLOGÍA

Hongos patógenos en la selva

Los bosques de los trópicos están siendo destruidos o transformados a escala global, lo que conlleva la proliferación de numerosas enfermedades fúngicas en las plantas

Julieta Benítez Malvido

Los organismos patógenos controlan numerosos procesos ecológicos y evolutivos en los ecosistemas naturales. En las comunidades vegetales, desempeñan funciones importantes: no solo influyen en la incorporación de nuevos individuos a las poblaciones de plantas (reclutamiento), sino que también determinan la composición de especies, al modificar de distinto modo la supervivencia, crecimiento y fecundidad, y al reducir la capacidad competitiva de las plantas afectadas.

En los bosques tropicales, las interacciones entre las plantas y sus agentes patógenos, entre ellos, hongos, nemátodos, viroides, virus, bacterias y plantas parásitas, han recibido una atención muy limitada. No obstante, tales organismos ayudan a mantener la gran diversidad de especies propia de esos ecosistemas, facilitan los procesos de sucesión ecológica (sustitución de unas especies por otras durante la evolución de un ecosistema) y promueven la diversidad genética y la estructura de las poblaciones hospedadoras.

Si bien en condiciones naturales los hongos patógenos desempeñan funciones importantes desde un punto de vista ecológico, la alteración del medio por la excesiva presión humana promueve la proliferación de las infecciones fúngicas en las plantas, lo que contribuye a degradar aún más el hábitat.

Los hongos (incluidos los Oomycetes, grupo de protistas filamentosos parecidos a los hongos) representan la principal causa de enfermedades en las plantas. Cerca del 75 por ciento de todas las patologías vegetales son de origen fúngico. Junto con los insectos fitófagos, constituyen la mayor amenaza en las plantas cultivadas y en las silvestres. La infección por hongos puede causar necrosis extensiva o local, o un crecimiento anómalo en las diferentes estructuras de las plantas.

La perturbación de los bosques tropicales por actividades humanas, como la tala selectiva, la deforestación y la apertura

Tras una perturbación, el bosque tropical tiende a regenerarse por sí solo y atraviesa distintas fases en que unas especies se sustituyen por otras (*bosque secundario, arriba*). Durante las primeras etapas de esta sucesión ecológica las plantas se muestran más vulnerables a las infecciones por hongos, en especial las plántulas del sotobosque (*abajo*).

EN SÍNTESIS

Los hongos patógenos, en especial los que atacan las hojas, constituyen la mayor amenaza para las plantas del bosque tropical, ya que representan la causa principal de enfermedades vegetales.

Las características físicas del entorno (luz, temperatura, humedad) influyen sobremanera en la propagación de los hongos. Estas se alteran con la actividad humana, que modifica a la vez la estructura y composición de la vegetación. Bajo condiciones de estrés, las plantas resultan más vulnerables al ataque fúngico.

En el presente artículo se describe la interacción de las plantas con los hongos patógenos foliares y se debaten las implicaciones de la proliferación de enfermedades en el mantenimiento de la biodiversidad.

Fragmentación del bosque y enfermedades

Las selvas tropicales sufren desde hace decenios una notable fragmentación del territorio debido a la tala selectiva, la deforestación y la apertura de caminos. Ello se muestra en esta imagen de satélite procedente del Proyecto sobre dinámica biológica de fragmentos forestales que lleva a cabo el Instituto Nacional de Investigación de la Amazonía de Brasil en colaboración con la Institución Smithsoniana estadounidense. La imagen corresponde a una región de Manaus, en la Amazonía brasileña: se distinguen zonas de bosque continuo (*verde oscuro*), fragmentos de bosque rodeados de pastizales (*rojo*) y vegetación secundaria, en fase de regeneración (*verde claro*).



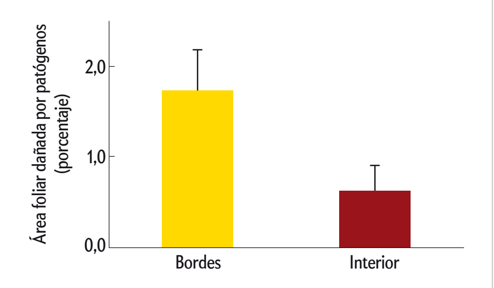


Apertura de un camino en la Amazonía Central.

El efecto de borde

La apertura de caminos (*izquierda*) da lugar a la aparición de transiciones abruptas entre el bosque natural y el medio degradado. La interacción que se produce entre los ecosistemas adyacentes resultantes corresponde al «efecto de borde». Al constituir el área más alterada del hábitat fragmentado, los bordes ofrecen una puerta de entrada a los microorganismos patógenos. Estos suelen atacar a las hojas de los individuos más jóvenes, en especial, las plántulas del sotobosque.

En una investigación realizada en Chajul (Chiapas) se compararon plantas del interior del bosque (*rojo*) con otras de los bordes (*amarillo*). Estas, más expuestas, resultaron ser las más dañadas: presentaban una mayor área foliar necrosada por hongos, así como un crecimiento más rápido de las manchas necróticas.



Planta hospedadora (Familia)	Hongos patógenos
Ampelocera hottlei (Ulmaceae)	*Fusarium* sp.
Brosimum alicastrum (Moraceae)	*Cercospora* sp., *Chalara* sp., *Colletotrichum* sp., *Fusarium*, *Gilmaniella* sp., *Tubercularia* sp.
Piper hispidum (Piperaceae)	*Glomerella* sp.
Psychotria chiapensis (Rubiaceae)	*Monilochaetes* sp., *Tubercularia* sp.
Inga vera (Fabaceae)	*Cercospora* sp.
Cecropia obtusifolia (Cecropiaceae)	*Cercospora sp., Chalara sp., Colletotrichum sp., Fusarium sp., Gilmaniella sp., Rhizoctonia sp., Tubercularia sp., Verticillium sp.*
Guarea glabra (Meliaceae)	*Basipetospora sp.*
Vismia camparaguey (Clusiaceae)	*Botrytis cinerea*

Algunas de las especies de plántulas más comunes y hongos patógenos que suelen infectar su follaje.

de caminos, provoca la fragmentación del hábitat y modifica los factores abióticos del entorno (las características físicas como la luz, la temperatura y la humedad) y los factores bióticos (relativos a los seres vivos, como la identidad y densidad de individuos de la planta huésped). Todo ello favorece la aparición de daños por hongos y cambia la abundancia y riqueza de insectos herbívoros que pueden actuar como vectores de enfermedades.

En el presente artículo se examinan las condiciones ambientales que determinan la proliferación de hongos en el bosque tropical y se analiza el impacto de las actividades humanas sobre los niveles de infección fúngica. Los ejemplos aquí mencionados proceden de estudios realizados en sistemas tropicales naturales, mucho menos abundantes en la bibliografía que las investigaciones sobre patologías en sistemas agrícolas.

SÍNTOMAS EN LAS PLANTAS

Como consecuencia del ataque fúngico, las plantas sufren una serie de alteraciones o síntomas. Estos pueden afectar a la morfología o aspecto externo de la planta, con la aparición de manchas necróticas (oscurecimiento o ennegrecimiento provocado por la muerte del tejido vegetal), clorosis (amarillamiento o blanqueo del tejido foliar debido a su destrucción o a la producción insuficiente de clorofila), deformación (crecimiento anómalo de

PROYECTO SOBRE DINÁMICA BIOLÓGICA DE FRAGMENTOS FORESTALES (*imagen de satélite*); CORTESÍA DE J. BENÍTEZ MALVIDO (*apertura de caminos*); GRÁFICA ELABORADA A PARTIR DE DATOS OBTENIDOS EN CHAJUL, CHIAPAS, DE BENÍTEZ MALVIDO Y LEMUS-ALBOR EN *BIOTROPICA*, VOL. 37, PÁGS. 301-313, 2005.

Hoja de *Calathea inocephala* **(Marantaceae) con síntomas de necrosis (*manchas marrones*) y clorosis (*manchas amarillas*) en bordes del bosque tropical de Chajul (Chiapas). Las principales especies patógenas de las calateas son *Alternaria alternata*, *Drechslera setariae* y *Fusarium oxysporum*.**



los tejidos, de los órganos o de toda la planta), pudriciones, chancros, agallas y muerte descendente (desde el borde hacia el centro de las hojas, o desde el ápice de los tallos y ramas hasta la base de los mismos). O bien pueden ser de carácter interno, como las alteraciones histológicas, que se ubican en células y tejidos y provocan hiperplasia e hipertrofia (crecimiento excesivo de tejidos y órganos), y las alteraciones fisiológicas, con un aumento de la transpiración, inmovilización de nutrientes y reducción de la fotosíntesis.

Las enfermedades causadas por hongos son comunes en el sotobosque y el dosel de los ecosistemas forestales neotropicales. Atacan a las plantas en las diferentes fases de su ciclo vital, y también a distintas formas de crecimiento, entre ellas, árboles, arbustos, lianas, palmeras y herbáceas. Las hojas representan los órganos más afectados, que sufren necrosis, clorosis y deformación. Los síntomas asociados con necrosis incluyen manchas de diferentes formas y colores en las hojas y, en algunos casos, las manchas necróticas foliares presentan un halo clorótico.

Los patógenos foliares, habituales en la comunidad de plántulas del sotobosque, suelen provocar daño en una superficie reducida, en promedio, menos del dos por ciento del área foliar. Sin embargo, aun daños pequeños ocasionan una disminución considerable de la superficie foliar en el conjunto de la plántula. Al reducirse el área fotosintética se ven gravemente afectados el crecimiento, la supervivencia, la reproducción y la capacidad competitiva de la planta hospedadora.

Existen otros hongos que destruyen las semillas, alteran el tejido vascular de las plantas, causan pudrición de raíces, troncos y tallos, y atacan a flores y frutos. Sin embargo, los hongos foliares son los más comunes, por lo que también las enfermedades que producen son las más estudiadas.

INFLUENCIA DEL ENTORNO

Las condiciones ambientales de un lugar, sean de origen biótico o abiótico, determinan la expresión de los síntomas de la enfermedad. Predisponen a la planta a la infección y, una vez iniciada esta, intervienen en la asociación entre patógeno y huésped.

La temperatura, la luz, la humedad y los minerales son características del entorno físico estrechamente relacionadas con la distribución de las enfermedades. Los cambios repentinos en cualquiera de las condiciones ambientales, sean estos intensos o leves, ocasionan estrés a las plantas, que se debilitan y se vuelven más vulnerables a las enfermedades.

La temperatura y la humedad representan los factores más influyentes en el desarrollo de patologías fúngicas. La germinación de las esporas (las unidades reproductoras de los hongos) se ve favorecida por temperaturas moderadas y una humedad elevada. Cada especie de patógeno presenta una temperatura óptima de crecimiento. Además, las diferentes etapas de desarrollo de un hongo, como la producción de esporas, su germinación y el crecimiento del micelio (las hifas o filamentos que constituyen el hongo) pueden diferir ligeramente en sus temperaturas óptimas. Por otro lado, una humedad alta favorece la aparición de la gran mayoría de las enfermedades foliares causadas por hongos, ya que la germinación de las esporas y el inicio de la infección exigen por lo general la presencia de agua.

Numerosas patologías fúngicas resultan más intensas en condiciones de humedad elevada, baja intensidad lumínica, escasez de algún mineral y temperatura moderada. En las plántulas de



Daño causado a árboles adultos **en la Amazonía Central, después de la tala y extracción selectiva de una especie arbórea de interés económico. Como consecuencia de esas actuaciones, se producen rotura de ramas y de troncos, desenraizamiento, aplastamiento de plantas del sotobosque y heridas en los troncos, condiciones que favorecen las infecciones fúngicas.**

CORTESÍA DE AURORA LEMUS-ALBOR (*Calathea inocephala*); J. BENÍTEZ MALVIDO (*árboles dañados*)

diversas especies arbóreas, el ahogamiento o podredumbre de tallos y raíces causadas por hongos del suelo (generalmente, los Oomycetes *Phytophthora* y *Pythium*) es más severa en los suelos saturados de agua y en las zonas sombreadas.

Diferentes tipos de alteraciones naturales (deslizamientos de tierra, apertura de claros por la caída de árboles, actividad animal) y humanas (tala selectiva, deforestación y apertura de caminos) provocan cambios en la estructura de la vegetación y la caída y acumulación de hojarasca sobre el suelo. Ello, a su vez, modifica la incidencia de luz, la humedad y la temperatura del entorno de la planta. Hay pruebas de que todos esos factores producen efectos negativos sobre la germinación, establecimiento y desempeño de las plantas. Pero además favorecen la aparición de daños por hongos y la proliferación de algunas especies de insectos herbívoros que actúan como vectores de enfermedades.

Las variaciones en la cubierta de hojarasca van desde áreas donde el suelo mineral se halla expuesto hasta áreas donde la hojarasca se acumula sobre el mismo en grandes cantidades. En un estudio que llevamos a cabo en Los Tuxtlas, Veracruz (México), se observó que las plántulas del árbol *Nectandra ambigens* (Lauraceae) que crecían bajo una espesa capa de hojarasca presentaban un mayor daño por patógenos foliares (*Colletotrichum* sp. y *Phomopsis* sp.) que aquellas que se desarrollaban con una capa delgada de hojarasca o en ausencia de ella. Se piensa que la acumulación de hojarasca procedente de los árboles adultos creó un ambiente más húmedo y facilitó la infección de las plántulas, que recibieron el inóculo del dosel del bosque.

Dentro de los factores bióticos que determinan la severidad de las enfermedades cabe mencionar la identidad y densidad de plantas del huésped. En la isla panameña de Barro Colorado, el grupo de Carol Augspurger, de la Universidad de Illinois, observó que las plántulas de *Platypodium elegans* (Papilionoideae) sufrían una mayor mortalidad por la podredumbre de raíces y tallos cuando crecían formando manchas muy densas y cuando se situaban cerca de árboles adultos de la misma especie. Por otro lado, el equipo de Gilbert, de la Universidad de California, demostró que el chancro o cancro producido por hongos patógenos (*Phytophthora*) atacaba con menor intensidad a los individuos juveniles de *Ocotea whitei* (Lauraceae) cuando estos disminuían de densidad o se alejaban de los árboles adultos.

LA ACTIVIDAD HUMANA

Las perturbaciones de origen antrópico (tala selectiva, deforestación y apertura de caminos) dan lugar a la fragmentación del territorio y a la aparición de bordes entre el bosque natural y el medio degradado. La creación de caminos tiende a provocar en el hábitat remanente el «efecto de borde». Este se puede definir como la interacción entre dos ecosistemas adyacentes separados por una transición abrupta. Los bordes representan el área más alterada de un hábitat fragmentado; sus efectos pueden propagarse cientos de metros hacia el interior del bosque.

Además, se considera que los bordes de los sistemas forestales constituyen el punto de entrada de influencias externas, como la invasión de flora y fauna exóticas, pero también de microorganismos patógenos. En Chajul (Chiapas), al examinar plántulas de árboles y herbáceas que crecían en fragmentos de bosque, o cerca de bordes forestales y de la carretera, nuestro grupo descubrió que presentaban una mayor área foliar necrosada por hongos, así como un crecimiento más rápido de las manchas necróticas, que las plántulas que se desarrollaban en

En zonas desforestadas del bosque tropical perturbado en Chajul (Chiapas) se produce la invasión de una especie de helecho exótica (*Pteridium* sp.), muy difícil de erradicar.



CORTESÍA DE RAFAEL LOMBERA





Las poblaciones de algunos insectos herbívoros, como las larvas de mariposa *Opsiphanes* spp. (*arriba*), se alimentan de modo específico de hojas de plantas del género *Heliconia* (*Heliconia aurantiaca*, *izquierda*). Los hongos patógenos que comúnmente las infectan, entre los que se incluyen los géneros *Fusarium*, *Cilindrocladium* y *Oidium*, se hallan muchas veces favorecidos por el ataque de los herbívoros.

CORTESÍA DE BRÁULIO A. SANTOS

el interior del bosque. Por otro lado, en las superficies reducidas de un paisaje fragmentado en la selva amazónica, en Manaus, se observó también un mayor daño foliar por hongos. En contraste, en la isla de Barro Colorado se comprobó que el ahogamiento o podredumbre de tallos y raíces era casi inexistente en los bordes de selva, sujetos a una mayor incidencia de luz. Estos efectos contradictorios se deben a la distinta adaptación de los hongos al nuevo medio: mientras que algunos se ven favorecidos en hábitats abiertos, con una mayor radiación solar, otros, como los que producen ahogamiento en plántulas de árboles, se ven debilitados.

Algunas especies de patógenos se valen de heridas en las plantas (causadas por insectos o por otro medio) para proliferar con éxito en el nuevo huésped. Las heridas provocadas por la caída de árboles y otros objetos del dosel (ramas) en bordes y fragmentos de selva, y por la tala selectiva y apertura de caminos, pueden proveer de sitios de infección. Una vez establecidos en una planta, los hongos pueden propagarse a las vecinas. En el Amazonas Central se descubrió que las hojas de árboles juveniles presentes en áreas sometidas a una tala selectiva de árboles exhibían un mayor daño por patógenos foliares que los individuos de las áreas conservadas.

Por otro lado, existen indicios de que las comunidades de insectos, posibles vectores de enfermedades, cambian con la alteración del hábitat, aunque ese cambio puede resultar diverso. En ciertas zonas de Chiapas, descubrimos que las poblaciones de algunos insectos herbívoros que se alimentan de modo específico del género *Heliconia* (Heliconiaceae), como los escarabajos *Cephaloleia* spp. y las larvas de mariposa *Opsiphanes* spp. y *Caligo* spp., disminuían drásticamente como consecuencia de la fragmentación de la selva, con lo que se reducía también el daño que estos ocasionaban a las plantas. Por el contrario, las hormigas cortadoras de hojas, consideradas herbívoros generalistas (*Atta* spp.), aumentaban su abundancia al degradarse el bosque.

Otra característica predominante de los bosques tropicales alterados se deriva del uso ganadero del bosque (con la consiguiente tala y quema de los árboles) y la posterior interrupción de la explotación. Ello da lugar a pastizales abandonados y bosques secundarios de diferentes edades y estados sucesionales, donde la incidencia de luz y la temperatura del suelo y del aire suelen ser mayores que en el bosque conservado. Estas condiciones extremas originan estrés hídrico en las plantas tropicales, lo que las hace más vulnerables a las enfermedades. En un estudio se observó así que las plántulas de árboles presentes en los pastizales ganaderos abandonados de Chajul y en un bosque secundario joven de Manaus exhibían un mayor daño por patógenos foliares que los bosques maduros próximos.

INFECCIONES EN CLAROS DE BOSQUE

En general, las condiciones de alta humedad, temperaturas moderadas y baja irradiación favorecen la proliferación de diversos tipos de hongos patógenos en la vegetación. Sin embargo, ciertos datos indican que algunos patógenos parecen hallarse adaptados a una humedad baja y a una irradiación y temperatura elevadas. Las superficies forestales pequeñas y los bordes presentan microclimas más cálidos (unos 3 ^{o}C más) y secos (humedad inferior en un 50 por ciento) que el bosque tropical no fragmentado, como también los pastizales ganaderos abandonados y los primeros estadios sucesionales del bosque. En tales casos suelen aparecer royas (*Puccina* y *Uromyces*) y mildius pulverulentos (*Erysiphe* y *Uncinula*). Las royas se caracterizan por la formación de pústulas en las hojas (envés) y tallos; generalmente originan manchas amarillentas, anaranjadas o rojizas (soros). En tanto que los mildius pulverulentos se caracterizan por la cobertura de las hojas y tallos con una capa algodonosa de micelio blanquecino en forma de estrella (oídios).

La presencia del rocío suele ser crucial en la infección de las hojas por hongos. Se ha observado que la formación de rocío es mayor en plantas que crecen en ambientes abiertos. La superficie de las hojas permanece mojada mayor tiempo durante la noche en esas áreas (claros de selva, bordes, pastizales, etcétera) que en el interior de la selva. Además, el estrés que experimentan las plantas hospedadoras de las zonas abiertas (con temperaturas más extremas) las hace más susceptibles a la infección. Numerosas especies de plantas tropicales atacadas por royas (45 por ciento) y cenicillas (50 por ciento) medran en esas zonas. De hecho, ciertos patógenos se asocian a familias de plantas propias de ambientes tropicales alterados. Tal es el caso de las cenicillas (Basidiomycetes), que infectan a plantas de las familias Poaceae y Asteraceae, y las royas (Basidiomycetes), que habitualmente atacan a especies de Fabaceae.

CONSECUENCIAS EN EL ECOSISTEMA TROPICAL

La rápida transformación de los bosques tropicales a causa de la actividad humana conlleva enfermedades fúngicas que no solo afectan a la vegetación remanente sino también a la comunidad que se desarrolla después (bosques secundarios). Las infecciones pueden provocar un decremento de las poblaciones de plantas o la extinción de especies, con la consiguiente disminución de la biodiversidad.

Existen numerosos ejemplos de epidemias de origen fúngico que han devastado las poblaciones vegetales en bosques templados y en otros sistemas. Estas comunidades experimentan cambios drásticos en su estructura y composición de especies. En algunos casos, las epidemias han eliminado de las áreas infestadas las especies vegetales más vulnerables. Hay que considerar que los patógenos, además de atacar a sus especies hospedadoras, afectan de modo indirecto a la fauna asociada. En consecuencia, la extinción de una planta huésped de un área en particular puede tener efectos en cascada sobre otros organismos que dependen de ella para su subsistencia (como los insectos fitófagos y los animales que anidan en ella). Y viceversa, la pérdida de algún patógeno puede perjudicar la biodiversidad debido a que la planta huésped se libera de un importante regulador de su población, lo que permite que esta crezca sin control y desplace a otras especies vegetales.

Todavía existen muchas cuestiones por resolver sobre la fitopatología del bosque tropical. En la actualidad, en la mayoría de los casos se desconoce la agresividad de las distintas enfermedades (si es de carácter endémico o epidémico), el origen de la infección (hongos exóticos o nativos) y el tipo de dispersión del patógeno (contacto directo, dispersión por agua, viento o por insectos vectores).

Los escasos datos de los que se dispone suelen indicar que la alteración del bosque tropical y, por lo tanto, de su microclima y otros aspectos ecológicos favorecen la proliferación de hongos patógenos. Sin embargo, no todos los hongos se desarrollan mejor en un hábitat perturbado, por lo que es necesario conocer las historias naturales de los patógenos más relevantes en las poblaciones de plantas tropicales.

Las investigaciones deben profundizar en la identificación de las principales especies de hongos patógenos en los ecosistemas tropicales naturales no alterados y en la descripción de los procesos ecológicos involucrados en la transmisión, emergencia y diseminación de las enfermedades. Por último, hay que prestar especial atención al riesgo que conlleva la degradación del hábitat sobre la introducción de nuevas especies de hongos y proliferación de enfermedades en los bosques tropicales.

PARA SABER MÁS

Plant diseases and the conservation of tropical forests. G. S. Gilbert y P. Hubbell en *BioScience*, vol. 46, págs. 98-106, 1996.

Evolutionary ecology of plant diseases in natural ecosystems. G. S. Gilbert en *Annual Review of Phytopathology*, vol. 40, págs. 13-43, 2002.

Life-history strategies of plant pathogens: distribution patterns and phylogenetic analysis. G. García-Guzmán y E. Morales en *Ecology*, vol. 88, págs. 589-596, 2007.

Disease spread, susceptibility and infection intensity: vicious circles? P. M. Beldomenico y M. Begon en *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 25, págs. 22-27, 2009.

Insect herbivory and leaf disease in natural and human disturbed habitats: lessons from early-successional heliconia herbs. A. B. Santos y J. Benítez-Malvido en *Biotropica*, marzo de 2011 (publicación en línea).

por Sid Perkins

El gigante durmiente

La reactivación del volcán situado bajo este lago de apariencia tranquila ha motivado una inusual colaboración entre científicos chinos y coreanos

Las aguas serenas del lago del Cielo, una de las atracciones turísticas más visitadas del noreste asiático, no dejan intuir que en realidad ocupan el cráter de uno de los volcanes más peligrosos de la región: un pico conocido como la montaña Changbai en China y el monte Baekdu en Corea. El volcán, de 2744 metros de altura y situado en la frontera entre China y Corea del Norte, entró en erupción por última vez en 1903, pero en los últimos años se han observado indicios de reactivación.

El lago da origen a tres ríos asiáticos que, en caso de erupción, podrían encauzar lahares: devastadoras mezclas de ceniza caliente, barro y agua que presentan la consistencia del cemento húmedo. Una erupción de gran magnitud podría originar tales flujos, que descenderían por las laderas del volcán y supondrían una amenaza para cientos de miles de personas.

El gran terremoto y el consecuente tsunami que arrasaron Japón en marzo del año pasado pusieron a los científicos locales en acción. En agosto se estableció una colaboración inusitada entre geólogos procedentes de China y Corea del Norte. Llevaron a cabo campañas de campo en el volcán y planificaron un curso sobre predicción y preparación ante desastres naturales. El acceso a la red de detección sísmica instalada en la vertiente china en 1999 y a los equipos de GPS localizados en las laderas del edificio volcánico ha permitido identificar una serie de terremotos superficiales y una elevación gradual de la montaña que progresa desde 2002. Se considera que estos fenómenos responden a movimientos de magma en el interior de la cámara magmática emplazada bajo el volcán, lo que podría aumentar las probabilidades de una erupción.





por Javier de Lorenzo

Javier de Lorenzo es catedrático de lógica y filosofía de la ciencia en la Universidad de Valladolid



Matemática con estilo

La filosofía de la matemática se ocupa no solo de los fundamentos, sino también del hacer matemático

Desde el Segundo Congreso Internacional de Matemáticos, celebrado en 1900 en París, han resonado en el pensamiento matemático dos grandes tesis planteadas allí por David Hilbert. La primera: que todo problema es resoluble, no hay cuestiones indecidibles en matemática. Y la segunda: que los fundamentos de la matemática constituyen un problema que, en virtud de la tesis anterior, puede y debe resolverse de manera rigurosa y definitiva con métodos matemáticos, no especulativos. Una vez adoptados esos dos presupuestos, pensar sobre la matemática no será sino discutir sobre sus fundamentos. Filosofía de la matemática igual a fundamentación de la matemática.

Desde los años veinte, ese enfoque se desarrolló a través del debate entre dos grandes líneas de pensamiento. La primera consideraba que los fundamentos se encuentran en un sistema sintáctico lógico-formal, que ha de ser no-contradictorio. La segunda estimaba que los fundamentos se hallan en la intuición de un sujeto trascendental, que termina encerrado en un solipsismo absoluto. Se vivieron entonces duras polémicas entre formalistas e intuicionistas, que no fueron únicamente teóricas, sino que tuvieron sus repercusiones académicas y profesionales. Dichas polémicas terminaron con el triunfo del formalismo sintáctico, que veía la matemática como algo objetivo y, en el fondo, sin sujeto cognoscente. Filosofía de la matemática igual a fundamentación lógico-formal de la matemática.

Tras la Segunda Guerra Mundial se impuso en Europa el pensamiento de un matemático excepcional que no existió como individuo de carne y hueso, sino como colectivo de autores, aunque fuera considerado *el* matemático por excelencia: Nicolás Bourbaki. Tomando los conjuntos como base, Bourbaki establece la existencia de tres grandes *estructuras-madre*: la topológica, la reticular y la algebraica. El trabajo matemático gira en torno a estas estructuras y a sus combinaciones. En consecuencia, el pensamiento matemático habrá de ser básicamente conjuntista y estructuralista.

El estructuralismo se impone en todos los ámbitos. Dentro de la matemática, el estructuralismo culmina en la teoría de categorías. Pero, desde los años cincuenta, se convierte en un auténtico fenómeno social. Toda disciplina aspira al calificativo de estructural: la lingüística, la crítica literaria, la sociología, la antropología, el psicoanálisis. Hasta el marxismo pasa de ser existencialista, a lo Sartre, a convertirse en estructural.

Jean Piaget adopta las estructuras-madre bourbakistas como los elementos esenciales para su epistemología genética, y afirma que el proceso evolutivo de todo individuo condiciona y viene condicionado por estas estructuras. El niño pequeño capta relaciones topológicas, como estar dentro o fuera, la relación de frontera y otras. Cuando comienza a andar, lo que hace, en realidad, es integrar el grupo de desplazamientos de un cuerpo rígido en el espacio, grupo que resulta ser la materialización de las estructuras algebraicas. Ya en la adolescencia, lo que se agrega a las estructuras anteriores es la relación de inclusión, que supone, entre otras, estructuras reticulares y de orden.

Dotados de esa base teórica, y motivados por las causas políticas de la Guerra Fría, algunos países reforman la educación para plasmar en lo pedagógico esas líneas epistemológicas. Parte de estas reformas educativas se encuadran bajo el rótulo de «matemáticas modernas». Como consecuencia de las mismas, puede que Juanito no supiera sumar, pero sí que aprendía a manejar conjuntos de piezas de colores. Los fundamentalismos matemáticos basados en los conjuntos y en las estructuras-madre se impusieron en el mundo occidental durante la segunda mitad del siglo XX, desde los niveles educativos más básicos.

El resultado obtenido fue un estructuralismo formalista, donde el conocimiento aparece como algo objetivo, independiente del sujeto. Lo que menos importa es la génesis o la heurística del pensamiento, solo cuenta el fundamento de lo producido. El influjo de Hilbert llegó a ser absoluto gracias al Círculo de Viena y a la filosofía analítica, y no solo a causa del estructuralismo formalista de Bourbaki. Esta visión se convirtió en una ortodoxia, donde los valores eran el rigor formal, la verdad demostrativa sintáctica y la lógica subyacente. Quedó marginado el pensamiento de matemáticos que habían mantenido una posición distinta, como Henri Poincaré, quien fue considerado —en palabras pronunciadas por el matemático belga Benoît Mandelbrot en los años ochenta— como «el diablo para Bourbaki».

Frente a ese influjo, surge en el terreno del pensamiento científico la obra de Tomas Kuhn. Su libro *La estructura de las revoluciones científicas* se edita en 1962. Frente al mismo influjo, pero esta vez desde el terreno del pensamiento matemático, publiqué en 1971, desconociendo entonces la existencia de Kuhn, *Introducción al estilo matemático*. Esta obra constituyó, en el momento de su aparición, una especie de panfleto revolucionario, porque, frente al pensamiento formalista y bourbakista imperante en los medios académicos y profesionales, sostenía que en el hacer matemático existen diferentes estilos de expresión y, por ello, de pensamiento. Esta afirmación se apoyaba en ejemplos de cada uno de los estilos que se iban especificando a lo largo del libro.

Aceptar la existencia de diferentes estilos matemáticos suponía, a la vez, aceptar la existencia en el hacer matemático de componentes axiológicos, entre los que se incluyen, junto a los valores ontológicos, epistemológicos y metodológicos propios de los fundamentalismos, los valores pragmáticos, éticos y estéticos. Estos valores, como afirmaba explícitamente, componen campos irreducibles entre sí, pero nunca incompatibles.



WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO (*Melencolia I, grabado de Alberto Durero*)

Ese libro constituyó la demostración fáctica de que se podía pensar acerca de la matemática sin centrarse exclusivamente en sus posibles fundamentos y en las diferentes escuelas de los mismos. Además, mostraba que esos fundamentos desaparecían como tales, que no eran más que simples formulaciones dogmáticas de quienes los propugnaban.

Fue también una demostración fáctica de que, al aceptar la existencia de valores inherentes al hacer matemático, y como simple consecuencia de tal aceptación, surgen preguntas que no son meramente retóricas, pero que resultan impensables desde el enfoque ortodoxo. Por ejemplo, cabe plantearse el papel de la creatividad, el de los procesos históricos, el de los diferentes sentidos de rigor y de demostración, y el de las sociedades y colectividades matemáticas con sus respectivas publicaciones. Estas cuestiones conducen a inversiones y rupturas epistemológicas que se plasman en distintas formas de hacer, de trabajar la matemática, y que, por ello, se reflejan en diferentes estilos. El hacer matemático es mucho más rico de lo que contemplan los fundamentalismos, ya sean lógico-formales o intuicionistas.

Acudiendo a la historia, y no por la historia misma, sino como forma de estudiar los problemas filosóficos, se me mostró la existencia en el hacer matemático de diferentes *ámbitos*, o marcos, que he denominado *figural*, *global* y *computacional*. En estos ámbitos se sitúan los modos de razonamiento, los criterios de rigor, el enfoque con el que se consideran ontológicamente los objetos matemáticos y también las formas demostrativas, ya sean *constructivas*, *existenciales* o *computacionales*. En el interior de estos ámbitos se plasman y se solapan durante algún tiempo los estilos expresivos específicos de cada matemático creador y de cada escuela.

Frente a los dogmas fundamentalistas, quedaba claro que no todo estaba hecho y fundamentado de una vez y para siempre, ni todo problema era soluble, sino que la matemática se mostraba como *un hacer*, como el trabajo de unos individuos de la especie humana. Como trabajo, como praxis, la matemática está ligada a nuestra especie, y se convierte en una de las claves para el desarrollo de la misma. Su papel resulta indispensable, y no solo para su aplicación a ciencias naturales como la física, sino también para la vida diaria del individuo en la sociedad occidental.

La razón es que hemos construido un mundo espacial de formas euclídeas (habitaciones cúbicas, ventanas rectangulares, vasos cilíndricos, calles paralelas) y en él vivimos. Este espacio se ha convertido para nosotros en «natural», aunque no está dado en la naturaleza, en la *physis*. La especie humana lo ha construido para habitar en él, pero esta construcción se enfrenta, a su vez, a la misma naturaleza. Además, a este espacio de formas euclídeas se ha incorporado ahora un nuevo intruso, el ordenador, que se apoya en la computabilidad, en los algoritmos y, en el fondo, en el número. Nuestra vida ordinaria —y no solo la ciencia— transcurre ya en este espacio-número. Lo hemos construido y lo manejamos gracias a una tecnología material y racional apoyada en la matemática.

En definitiva, desde los años setenta la filosofía de la matemática se ha enriquecido con nuevos problemas. No se centra solo en la búsqueda de fundamentos, sino que nos habla también del hacer matemático, de sus estilos y de su creatividad. La nueva filosofía de la matemática limita con la etnomatemática, con la sociología y con la psicología de la matemática. Reflexiona sobre la función que desempeñan las diferentes demostraciones de un mismo teorema y sobre el papel de las figuras geométricas en el razonamiento matemático, que no suele ser estrictamente deductivo-demostrativo.

Si en 1971 hablar de los estilos matemáticos resultaba innovador e incluso revolucionario, hoy casi todo cae bajo ese término. Algo similar ha ocurrido con la idea de que la matemática es principalmente un hacer. Se ha difundido y transformado en otro de los tópicos de la actual filosofía de la matemática, si bien el término *hacer* ha sido reemplazado por el de *praxis* o *práctica*. Incluso se constituyó en 2009 la Asociación para la Filosofía de la Práctica Matemática (APMP).

PARA SABER MÁS

Introducción al estilo matemático. Javier de Lorenzo. Tecnos, 1971, 1989.

The architecture of modern mathematics. Dirigido por J. Ferreirós y J. Gray. Oxford University Press, 2006.

The philosophy of mathematical practice. Dirigido por Paolo Mancosu. Oxford University Press, 2008.

Filosofía sintética de las matemáticas contemporáneas. Fernando Zalamea. Universidad Nacional de Colombia, 2009.

PhiMSAMP: Philosophy of mathematics: Sociological aspects and mathematical practice. Dirigido por B. Löwe y T. Muller. College Publications, 2010.

por Carles Riba Romeva



Carles Riba Romeva es especialista en diseño de máquinas y profesor del departamento de ingeniería mecánica de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Decrecimiento energético

O reducimos el consumo y nos pasamos a las renovables, o no superaremos la crisis energética que se cierne sobre el planeta

Las Naciones Unidas han declarado el 2012 Año Internacional de la Energía Sostenible para todos. La iniciativa no podía ser más oportuna. Estamos a las puertas del declive de producción del recurso energético más estratégico: el petróleo. Si el consumo continúa creciendo al ritmo actual, en 2060 se producirá el agotamiento de las reservas totales de recursos energéticos no renovables (petróleo, gas natural, uranio y carbón). Por otra parte, las energías renovables permiten un uso menos intensivo y ofrecen una menor disponibilidad que las no renovables. Nos enfrentamos, pues, a un progresivo decrecimiento energético global que será especialmente intenso en los países más desarrollados y que acarreará profundas consecuencias sobre el actual sistema de desarrollo.

¿En qué baso esas afirmaciones? Durante mi actividad como profesor de ingeniería en la Universidad Politécnica de Cataluña, director de un centro de innovación tecnológica (CDEI-UPC) e impulsor de una fundación de fabricantes de bienes de equipo orientada a la innovación (CEQUIP), siempre había pensado que las limitaciones energéticas eran un tema aún lejano y que las medidas que se estaban adoptando para paliar el cambio climático eran las adecuadas.

Sin embargo, en 2006, a raíz de preparar una conferencia sobre ecodiseño, decidí investigar ciertas incongruencias entre datos sobre energía e impactos ambientales. (Ello ha dado lugar al libro *Recursos energéticos y crisis, el fin de 200 años irrepetibles*. La versión catalana puede descargarse en www.cdei.upc.edu; las versiones en español e inglés se hallan en fase de edición.)

Entonces vi claramente que el consumo de combustibles fósiles y el cambio climático formaban parte de una misma ecuación. Cuantos más recursos se descubran y consuman, más irremisible será el cambio climático. Las políticas de sostenibilidad que no impidan el consumo de las reservas, tan solo retrasaran un escenario final con más de 600 ppm (partes por millón) de CO_2 en la atmósfera, cuando los expertos alertan que no deben sobrepasarse los 450 ppm.

Según datos de la Administración de Información de Energía estadounidense (EIA) y la Agencia Internacional de la Energía de la OCDE (IEA), entre 1980 y 2008 el consumo mundial de energía aumentó un 72 % (de 10,4 a 17,9 teravatios, TW). Del consumo mundial actual, algo más del 84 % corresponde a energías no renovables. El gas natural presenta el mayor aumento relativo (111,4 %). El carbón, el mayor incremento absoluto (2,13 TW). Se hallan estancados el uranio y el petróleo, que anuncia su declive. La energía nuclear cubre solo el 5,1 %, casi en exclusiva en los países desarrollados.



Entre las energías renovables, los combustibles renovables y residuos cubren el 9,1 % del consumo mundial, la hidroeléctrica el 5,8 % y las nuevas energías eléctricas renovables (solar térmica y fotovoltaica, eólica, geotérmica y energía de los océanos) el 1,1 %. Los primeros corresponden mayoritariamente a la leña del bosque y a los residuos de cultivos y animales que usan unos 2.500 millones de personas de los países más pobres; solo un 0,4 % procede de biocarburantes. Aunque las nuevas energías renovables evolucionan rápidamente, cubren tan sólo el 1,5 % del consumo mundial, una cantidad insuficiente para compensar el declive de producción de petróleo que se avecina.

Las reservas, es decir, los recursos extraíbles y utilizables en condiciones técnicas y económicas viables, ya han sido en su mayoría descubiertas y exploradas, siendo los últimos hallazgos combustibles no convencionales en condiciones cada vez más cercanas a su inviabilidad.

Las reservas mundiales aceptadas por la EIA para 2007 corresponden a 1.126,2 TWa (energía producida por 1 TW durante un año), distribuidas en petróleo (23,0 %), gas natural (19,1 %), carbón (51,2 %) y uranio (6,7 %). El carbón, el combustible más abundante —y contaminante—, se localiza en EE.UU., Rusia, China, Australia (que exporta a Japón y Corea del Sur) e India (en conjunto, algo más del 80 %). El uranio es el más escaso, lo que pone en entredicho el renacer nuclear. Todo ello prefigura una crisis energética que afectará en primer lugar al transporte y a ciertas formas de producción globalizada.

¿Cómo podemos evitarlo? Para empezar, deberíamos reducir el derroche energético actual (un automóvil con un viajero aprovecha solo el 1 % de la energía primaria). Asimismo, tendremos que adecuar nuestras vidas a los recursos que ofrece la naturaleza, disminuir las prisas —que son ineficiencias— y dedicar un mayor trabajo a gestionar una energía y unos recursos muy difundidos pero sometidos a incertidumbres.

En definitiva, no se trata de un simple cambio tecnológico, sino de una nueva concepción del mundo donde primen la cooperación y la ética. Este será nuestro reto. Por el contrario, lanzarse a una carrera para acaparar los últimos recursos energéticos solo lleva a la crispación geoestratégica y a la destrucción de nuestro mañana.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorre un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o *TEMAS* por el precio de 4 = 26,00 €

SELECCIONES TEMAS

Ahorre más del 30 %

Ponemos a su disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materia.

3 ejemplares al precio de 2 = 13,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Fronteras de la física, Universo cuántico, Fenómenos cuánticos
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. CIENCIAS AMBIENTALES
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
10. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorre más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,50€

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €

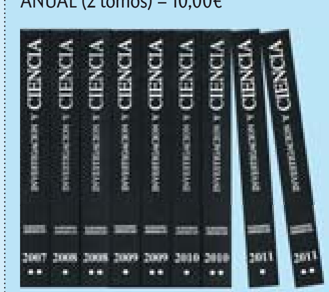
TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,50€

T-4: Máquinas de cómputo
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 10,00€



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,00€





GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

Por cada tramo o fracción de 5 productos
España: 2,80€ Otros países: 14,00€

Oferta Colección BSA
España: 7,00€ Otros países: 60,00€

Puede efectuar su pedido a través del cupón que se inserta en este número, llamando al 934 143 344 o a través de nuestra Web: www.investigacionyciencia.es



David H. Freedman ha publicado sobre temas científicos, económicos y tecnológicos durante más de 30 años. Su obra más reciente es *Equivocados: Por qué los expertos siguen fallando y cómo saber cuándo no confiar en ellos* (Editorial Empresa Activa, 2011). En ella explora las prácticas científicas que inducen a engaño.



MODELOS MATEMÁTICOS

Una fórmula para desencadenar una crisis

A pesar de las lecciones de 2008, las sociedades de inversión siguen empleando modelos demasiado complejos y poco fiables para evaluar los riesgos

David H. Freedman

La crisis económica causante de la recesión mundial que aún hoy nos ahoga se debió a numerosos factores. Uno de ellos fueron las matemáticas. Las sociedades de inversión habían desarrollado procedimientos tan complejos para invertir el dinero de sus clientes que, a la larga, acabaron confiando en fórmulas muy poco inteligibles para evaluar los riesgos. Como ya pudimos comprobar hace tres años, tales modelos no se corresponden sino con un pálido reflejo de la realidad. Tanto es así que, en ocasiones, pueden conducir al desastre.

El mundo financiero no es el único que a la hora de tomar decisiones se apoya en modelos matemáticos de fiabilidad dudosa. Se emplean simulaciones en un amplio abanico de disciplinas (como la climatología, la erosión de costas o la seguridad nuclear) en las que los fenómenos que se pretenden describir resultan demasiado complejos o donde acceder a toda la información se antoja muy difícil, y en otras, como las finanzas, donde ocurren ambas cosas. No obstante, ningún ámbito de la actividad humana profesa una fe tan ciega en una ciencia tan endeble como lo hace la economía financiera.

La solidez de la que presumían los modelos de riesgo otorgó a las sociedades de inversiones la confianza necesaria para apalancar sus apuestas con enormes sumas de dinero prestado. Los modelos debían evaluar el riesgo de tales operaciones, así como el modo de compensarlo con otras inversiones. Sin embargo, las enormes incertidumbres presentes en dichos modelos hicieron de ellos muy malos consejeros. «No sabemos lo bastante como para adquirir un buen dominio teórico sobre los riesgos que corremos», asegura David Colander, economista del Colegio Universitario Middlebury y experto en la crisis de 2008. «La idea de que un modelo puede dar cuenta de toda la incertidumbre y de todas las reacciones imprevisibles que vemos en los mercados es simplemente una locura. Pero es así como los hemos utilizado.»

Por supuesto, responsabilizar a los modelos de riesgo de todo el desastre económico pecaría de una simplificación excesiva. En la crisis han intervenido factores políticos y reglamentaciones deficientes. Con todo, puede argumentarse que los modelos supusieron el eslabón clave, quizá la condición imprescindible para la catástrofe. Con tanto en juego, durante los tres últimos años las sociedades de inversiones han desembolsado decenas de millones para reforzar los modelos de riesgo, con la esperanza de que algo como lo ocurrido en 2008 no se repita. Pero esas ilusiones pueden resultar vanas, y las expectativas, demasiado optimistas. De hecho, los expertos albergan serias dudas sobre la posibilidad de mejorar de manera apreciable los modelos de riesgo. Lo cual implica algo tan obvio como alarmante: los bancos y las sociedades inversoras están conduciendo la economía mundial hacia un futuro que amenaza con repetir el pasado.

LIQUIDEZ Y RIESGO SISTÉMICO

En cierto sentido, el fracaso de los modelos de riesgo en 2007 y 2008 posee una explicación sencilla. Se suponía que dichos modelos simulaban complejas interacciones entre multitud de factores: fluctuaciones de los mercados, tipos de interés variables, precios de acciones, bonos, derivados y otros instrumentos financieros. Aun cuando así lo hicieran —lo cual es discu-

KYLE BEAN

tible—, fallaron a la hora de incorporar un escenario clave: ¿qué ocurre cuando todos quieren vender a la vez la totalidad de sus activos? Eso fue precisamente lo que sucedió en septiembre de 2008, cuando el Gobierno estadounidense decidió no rescatar a Lehman Brothers y la venerable institución declaró suspensión de pagos. El efecto dominó de la quiebra solo pudo evitarse mediante enormes inyecciones de dinero público.

A lo largo de 2007, los modelos de riesgo auguraban una probabilidad mínima de que una institución importante quebrase. Según Marco Avellaneda, matemático de la Universidad de Nueva York y experto en modelos de riesgo, un problema fundamental se debió a que los modelos omitieron una variable esencial en lo referente a la viabilidad de una cartera de valores: la liquidez; es decir, la capacidad del mercado para conjugar compradores y vendedores. La omisión de una «variable esencial» puede resultar crucial (un modelo que intente predecir retrasos aéreos no será muy fiable si no incluye un término que represente la influencia del mal tiempo). Y, de hecho, puede que la liquidez fuese la variable más importante a la hora de evaluar el riesgo de impago en los títulos con garantía hipotecaria, una gama de instrumentos financieros creados en torno a la explosión de préstamos inmobiliarios acaecida en el decenio anterior, sobre todo a prestatarios de alto riesgo (*subprime*). Cuando los precios de la vivienda comenzaron a descender en 2008, nadie conocía con certeza el valor de esos productos; en consecuencia, se dejó de comerciar con ellos: su liquidez se esfumó. Los bancos que los poseían no pudieron darles salida y el pánico cundió entre los inversores. Según Avellaneda, si los modelos financieros hubiesen identificado el riesgo de iliquidez, los bancos podrían haber rebajado antes el precio de tales instrumentos y los compradores hubiesen arriesgado menos dinero.

La omisión de una variable clave parece un error garrafal, pero los científicos lo cometen a menudo. En ocasiones no se percatan de que esa variable desempeña una función crucial; en otras, no saben cómo tomarla en cuenta. «Cuando no es posible incluir un factor con una influencia semejante, hay que tener muy buen criterio para juzgar la credibilidad de los resultados», añade. Lo mismo ocurre en otras situaciones. Cuando se construye un modelo sobre la propagación de una nueva forma de gripe, ¿cómo saber cuánta gente aceptará vacunarse? ¿Y la capacidad de los servicios de emergencia para sustituir piezas defectuosas y extinguir incendios en plantas nucleares sobrecalentadas?

Una vez identificada una omisión —lo cual suele costar bastante trabajo—, esta podrá subsanarse o no. Según Robert Jarrow, profesor de economía y finanzas en la Universidad Cornell, introducir la falta de liquidez en los modelos de riesgo no resulta fácil en absoluto, puesto que dicha variable exhibe un grado de linealidad mucho menor que el de la evolución normal de los precios. Los mercados pasan en un abrir y cerrar de ojos de una liquidez elevada a una nula. Viene a ser como ejecutar una simulación de la circulación del aire en torno a un avión que vuela a velocidades normales, y desarrollar otra para un aparato que se encuentra a punto de romper la barrera del sonido (numerosos aviones sufrieron percances antes de que los modelos aeroespaciales lograsen incorporar esos efectos). Jarrow investiga la manera de incluir la falta de liquidez en los modelos, pero advierte que las ecuaciones no admiten soluciones únicas ni bien definidas. La falta de liquidez constituye un factor impredecible: ningún modelo puede señalar el momento en que los compradores decidirán que un instrumento financiero no compensa los riesgos a ningún precio. Para dar cuenta de semejante comportamiento, deberían acomodarse un abanico de soluciones posibles, pero elegir la más conveniente puede resultar problemático. Jarrow puntualiza que los modelos en los que investiga ahora quizá se muestren útiles para estimar el riesgo de falta de liquidez, pero distan mucho de la perfección.

Los modelos se ocupan de salvaguardar a cada una de las instituciones financieras, pero no evalúan los riesgos sistémicos

Por desgracia, haber omitido la falta de liquidez no supuso el único error. Los modelos de riesgo se han concebido de cara a salvaguardar cada una de las instituciones; algo en apariencia razonable, dado que a cada una solo le preocupan sus propios problemas. Los reguladores dieron por sentado que si el riesgo de cada sociedad era bajo, el sistema se encontraría a salvo. Pero este supuesto se mostró falso, asegura Rama Cont, director del Centro de Ingeniería Financiera de la Universidad de Columbia. Aun en un sistema en el que todos sus integrantes gozan de una baja probabilidad de fracasar, el riesgo sistémico puede resultar excesivo si entre ellos existen fuertes relaciones de dependencia. Imagine que treinta individuos recorren un campo tomados del brazo. Aunque sea muy poco probable que una determinada persona tropiece, la probabilidad de que alguien —quien sea— lo haga puede no ser despreciable. Y, si eso ocurre, arrastrará a todos los demás. Según Cont, algo así ocurre hoy con las instituciones financieras: «Hasta 2008, los reguladores no consideraban las conexiones entre bancos a la hora de evaluar el riesgo. Al menos, deberían haber advertido que todos ellos habían invertido con fuerza en hipotecas de alto riesgo».

UN MAPA DEL DESASTRE

El suministro de energía eléctrica se enfrenta a un problema similar, señala Cont. El riesgo de fallo de una central determinada es bajo, pero una caída ocasional en cualquier parte de la red puede sobrecargar las otras plantas y provocar un apagón de grandes proporciones, como ya sucedió en EE.UU. en 1965, 1997 y 2003. Para reducir el riesgo sistémico, las compañías eléctricas realizan pruebas de tipo N-1, en las que se evalúa la repercusión del fallo de una sola planta en el conjunto de la red. Sin embargo, la industria eléctrica cuenta con la ventaja de conocer las conexiones existentes entre todas las centrales. El sistema financiero, por el contrario, se asemeja más bien a una caja negra. «Hoy en día nadie sabe qué aspecto tiene el sistema fi-

EN SÍNTESIS

La crisis de 2008 se debió, en parte, a los modelos empleados por las sociedades de inversión para calcular los riesgos.

Entonces, dichos modelos ignoraron los problemas de liquidez; aún hoy, siguen sin tomar en cuenta los riesgos sistémicos.

Los expertos investigan varias estrategias a fin de superar esas limitaciones e impedir un nuevo colapso financiero.

Tales estrategias amenazan, sin embargo, con recortar los beneficios, por lo que no es probable que los bancos las adopten.

nanciero», explica Cont. «No sabemos a ciencia cierta quién negocia con quién ni por cuánto dinero, por lo que no pueden predecirse las repercusiones de una quiebra como la de Lehman Brothers. En 2008, las autoridades dispusieron de 48 horas para elaborar toda suerte de conjeturas.»

La solución obvia consistiría en cartografiar todas esas conexiones. Cont se ha unido a quienes presionan a las instituciones financieras para que informen sobre sus transacciones a un banco de datos centralizado, dependiente del Gobierno. Y no solo en el ámbito nacional, sino en el mundial, dado que hoy el dinero no conoce fronteras. Los bancos, sin embargo, se muestran reacios. Informar a todo el mundo de que una institución se encuentra realizando una inversión de gran calibre podría desencadenar, por imitación, una compra generalizada y disparar los precios. Una venta masiva de activos, por otro lado, despertaría la sospecha de problemas en ese producto y todos los inversores podrían intentar recuperar su dinero a la vez. Según Cont, ese temor se desvanecería si se garantizase la confidencialidad de la información: «Los Gobiernos llevan años compartiendo datos sobre armas nucleares. Y la información financiera no es más comprometida que eso». De hecho, el decreto Dodd-Frank, elevado a la categoría de ley federal en EE.UU. en 2010, establece la creación de una «oficina de estudios financieros» que, en principio, podría actuar como recolectora de datos. Hasta el momento, sin embargo, no parece que haya ningún organismo con la capacidad de acumular toda la información necesaria para trazar un mapa detallado y al día del sistema financiero mundial. Esto significa que una crisis sistémica puede atraparnos tan desprevenidos hoy como en 2008.

Pero, aunque los organismos reguladores dispusieran de datos suficientes, los modelos no bastarían para manipularlos. Los modelos actuales, explica Darrell Duffie, profesor en la Universidad Stanford, son probabilísticos: no realizan hipótesis sobre el futuro, sino más bien ignoran las posibilidades de impago bajo cualquiera de las infinitas condiciones que podrían acaecer mañana. Huelga señalar que, para conseguir resultados fiables, no solo se necesitan torrentes de datos, sino también un conocimiento muy preciso de todas las fuerzas en juego, matemáticas muy complejas y una enorme potencia de cálculo. Y si así ocurre para un solo banco, la idea de exigir tales requisitos a la totalidad del sistema financiero roza el absurdo.

Como alternativa, Duffie propone realizar pruebas de resistencia: considerar en detalle varias situaciones que, en el futuro, pudiesen suponer una amenaza insólita. Identificar riesgos de impago en una situación concreta se antoja un problema más sencillo. Si, por ejemplo, usted desea evaluar qué ocurriría si un día no puede hacer frente al pago de su hipoteca, quizá le resulte más sencillo analizar las consecuencias de una reducción salarial del 10 por ciento que intentar prever toda eventualidad imaginable. Para un banco, podrían elegirse situaciones como una fuerte caída de la Bolsa, una morosidad en las hipotecas, o una escalada súbita de los tipos de interés. También deberían contemplarse los efectos de un impago por parte de una o varias instituciones financieras. «La idea consiste en simular una conmoción enorme en la cartera de un banco y ver cómo conseguiría salir adelante», señala Duffie. «No importa cuál sea la probabilidad de que una determinada situación se produzca; de todos modos, ilustraría las posibles fuentes de problemas.»

Duffie recomienda preguntar a los bancos cómo responderían ante una decena de escenarios escogidos con cuidado, cada uno de los cuales consideraría, además, el impago por parte de una de entre otras 10 entidades financieras. Si 10 bancos se planteasen la misma pregunta, el resultado sería una matriz de $10 \times 10 \times 10$, la cual proporcionaría a los reguladores financieros un panorama ilustrativo de los riesgos principales. Si en 2006 se hubiese pedido a los grandes bancos de EE.UU. que evaluasen la repercusión de una avalancha de incumplimientos hipotecarios y de la quiebra de dos gigantes financieros, las autoridades bien podrían haber reunido los datos necesarios para incitar al sistema a desenredar poco a poco su azarosa situación. El inconveniente, admite Duffie, se encuentra en que las pruebas de resistencia solo pueden abarcar, en términos reales, una fracción mínima de todos los contextos posibles. No se le puede exigir a un banco que haga un análisis exhaustivo de miles de incumplimientos posibles por parte de cientos de entidades. Aun cuando una prueba de resistencia demostrase la estabilidad del sistema frente a ciertos trastornos, la catástrofe podría llegar de la mano de cualquier otro escenario.

Por si fuera poco, las simulaciones adolecen de otra dificultad: a partir de cierto punto, la propia complejidad del modelo pasa a formar parte del problema. Paul Wilmott, matemático y anterior gestor de fondos de alto riesgo, afirma que los expertos suelen acabar ahogando sus simulaciones en docenas de términos cargados de variables y parámetros libres, cada uno de los cuales añade más incertidumbre. Al final, el resultado se torna casi ininteligible. Wilmott propugna que se encuentre lo que él llama «punto dulce matemático»: cuando un modelo contiene términos suficientes como para ofrecer una aproximación razonable de la realidad, pero sigue siendo lo bastante sencillo como para que tanto su funcionamiento como sus limitaciones resulten manejables. Sin embargo, pocos alcanzan ese equilibrio.

A buen seguro, durante los años venideros los modelos de riesgo seguirán sin resultar fiables. Entonces, ¿qué hacer? La única opción realista consiste en no darles crédito. Pero tal modo de pensar choca con las convicciones más profundas de Wall Street. Como sostiene Jarrow: «Nunca se ha incitado a desconfiar de los modelos porque los operadores siguen ganando enormes sumas de dinero con ellos. Todos creyeron que los modelos funcionaban bien hasta que sobrevino la crisis. Pero, ahora, vuelven a confiar en ellos». Parece probable que los modelos y los datos disponibles mejoren, afirma, pero no lo bastante como para dar por buenos sus resultados.

Si los reguladores atendieran a tales advertencias, obligarían a los bancos a aumentar sus reservas de efectivo y a emprender inversiones más seguras. Pero el precio de dicha precaución, advierte Avellaneda, sería un sistema menos eficiente: los inversores se enriquecerían menos y disminuiría el beneficio de los bancos, que dispondrían de menos dinero para conceder créditos. A todos se nos haría un poco más difícil salir adelante, pero sería menos probable que nos estrellásemos contra una nueva crisis. Ese sería el interés que recibiríamos a cambio.

PARA SABER MÁS

La ciencia de las burbujas y los colapsos. Gary Stix en *Investigación y Ciencia*, vol. 396, págs. 80-88, septiembre de 2009.

The failure of risk management: Why it's broken and how to fix it. Douglas W. Hubbard. Wiley, 2009.

Malas noticias: Los secretos y escándalos sobre la crisis financiera más dramática de Wall Street. Andrew Ross Sorkin. Planeta, 2010.

Systemic risk in banking ecosystems. Andrew G. Haldane y Robert M. May en *Nature*, vol. 469, págs. 351-355, enero de 2011.

Risk management models: Construction, testing, usage. Robert A. Jarrow en *Journal of Derivatives*, vol. 18, n.º 4, págs. 89-98, 2011.



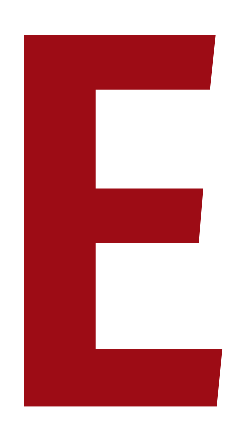
Jonathan A. Foley es director del Instituto del Medioambiente en la Universidad de Minnesota. Preside allí la cátedra McKnight de sostenibilidad global.

MEDIOAMBIENTE

Alimentación sostenible

Un plan global en torno a cinco ejes podría duplicar la producción de alimentos y aliviar las agresiones al medio

Jonathan A. Foley



N LA ACTUALIDAD, CASI MIL MILLONES DE PERSONAS SUFREN DE HAMBRUNA CRÓNICA. Aunque la producción mundial de alimentos bastaría para dar de comer a todos, su inadecuada distribución lo impide, y aun de permitirlo, la escalada en los precios de los alimentos haría imposible adquirirlos a muchos.

Pero además acecha otro enorme problema.

Hacia 2050, la población mundial habrá aumentado en 2000 o 3000 millones de habitantes, lo que probablemente doblará la demanda de alimentos, según diversos estudios. A ese aumento contribuirá el mayor nivel de vida de muchas personas, que consumirán más, sobre todo carne. Cada vez hay más cultivos destinados a la producción de biocombustibles, lo que impone nuevas exigencias a las explotaciones agrícolas. Aunque lográsemos resolver los grandes problemas actuales relativos al hambre, la pobreza y los costes, una tarea ya de por sí titánica, seguiría siendo necesario duplicar la producción de alimentos para poder satisfacer la demanda mundial.

Y no solo eso. La humanidad, al deforestar las selvas tropicales, cultivar tierras marginales y promover labradíos industriales en suelos frágiles y en cuencas hídricas, ha hecho que la agricultura se convierta en la mayor amenaza para el ambiente. Los cultivos ocupan ya un gran porcentaje de las tierras emergidas, con la consiguiente destrucción de hábitats, agotamiento de agua dulce y contaminación de ríos y mares. Además, liberan a la atmósfera más gases de efecto invernadero que ninguna otra actividad humana. Para asegurar la salud del planeta a largo plazo resulta imprescindible reducir drásticamente los impactos adversos de la agricultura.

La humanidad tiene que afrontar tres retos formidables, muy relacionados entre sí: garantizar la nutrición adecuada de los 7000 millones de habitantes actuales de la Tierra, duplicar la producción de alimentos en los próximos 40 años y lograr ambos objetivos de un modo sostenible para el ambiente.

¿Cómo alcanzar esas metas? Un equipo internacional de expertos, coordinados por el autor, ha formulado un plan de cinco



KEVIN VAN AELST

puntos que, aplicados de forma conjunta, aumentarían en más del doble los recursos alimentarios disponibles, a la vez que reducirían notablemente las emisiones de gases de efecto invernadero, las pérdidas en biodiversidad, y el consumo y contaminación de las aguas. No es exagerado afirmar que ese triple desafío constituye una de las pruebas más difíciles que haya tenido que afrontar nunca la humanidad. El modo en que reaccionemos va a determinar la suerte de nuestra civilización.

BARRERAS INSALVABLES

A primera vista, parecería obvio el modo de obtener más recursos para alimentar a una población creciente: hay que cosechar más, para lo cual hay que aumentar las tierras de labor y los rendimientos por hectárea. Desafortunadamente, existen importantes obstáculos ante ambos objetivos.

La agricultura ocupa ya alrededor del 38 por ciento de la superficie terrestre emergida, sin contar Groenlandia ni la Antártida, y constituye, con mucho, el principal uso que se le da a las tierras del planeta. La mayor parte de ese porcentaje corresponde ya a los suelos más aptos para el cultivo. Una gran proporción de la superficie restante se halla cubierta por desiertos, montes, tundras, hielos, ciudades, reservas naturales y otros espacios inadecuados para la agricultura. Las escasas tierras vírgenes existentes se sitúan sobre todo en selvas tropicales y en sabanas, que son vitales para la estabilidad del planeta, ya que contribuyen a retener carbono y conservar la biodiversidad. La expansión agrícola hacia esas zonas supone un grave error; aun así, durante los veinte últimos años se han venido roturando entre cinco y diez millones de hectáreas al año para dedicarlas a labradíos, una parte importante de ellas en los trópicos; esas operaciones solo aumentaron la superficie neta de tierra cultivable en un 3 por ciento, debido a la pérdida simultánea de cultivos asociada al desarrollo urbano y a otras fuerzas, sobre todo en las zonas templadas.

Mejorar el rendimiento representa un objetivo atrayente. Pero nuestro equipo ha comprobado que, globalmente, las cosechas han aumentado solo alrededor de un 20 por ciento en los últimos veinte años, mucho menos de lo que se suele proclamar. Se trata, sin duda, de una mejoría importante, pero a ese ritmo no se llegará, ni de lejos, a duplicar la producción hacia mediados de nuestro siglo. Y aunque el rendimiento de algunos cultivos haya ascendido de forma apreciable, en otros apenas ha variado, e incluso en ciertos casos decrecido.

Satisfacer la demanda mundial de alimentos resultaría menos difícil si todo cuanto se cultivara se destinara al consumo humano. Pero solo el 60 por ciento de los cultivos (en su mayoría cereales, y también legumbres, aceites vegetales, hortalizas y frutas) presenta esa finalidad. Otro 35 por ciento corresponde a piensos y forrajes para ganado, y el 5 por ciento restante, a biocombustibles y otros productos industriales. La demanda de leche y carne desempeña aquí un papel crítico. Incluso si se obtienen ambos productos con los mejores métodos, los cultivos para criar ganado reducen la capacidad de suministro de alimentos a la población. En explotaciones donde los animales se ceban con grano, se necesitan unos 30 kilogramos de cereales por kilogramo de carne de vacuno sin hueso. La obtención de carne de ave y de cerdo resulta más eficiente, mientras que el ganado bovino y ovino, si se alimenta con pastos, convierte en proteínas los materiales no digeribles por los humanos. Pero al final no importa de dónde provenga el filete: los sistemas de producción cárnica basados en cereales restan alimentos al mundo.

Otro elemento disuasorio a la hora de extender los cultivos es la alteración del medio, que ya resulta importante. Solo las diversas formas de producción y consumo de energía, con sus graves consecuencias sobre el clima y la acidificación de los océanos, rivalizan con la evidente magnitud del impacto ambiental de la agricultura. Nuestro equipo estima que la labranza ha eliminado o transformado en torno al 70 por ciento de las praderas prehistóricas, el 50 por ciento de las sabanas, el 45 por ciento de los bosques caducifolios de las zonas templadas y el 25 por ciento de las selvas tropicales. Ningún otro fenómeno, desde la última glaciación, ha perturbado los ecosistemas en mayor medida. La huella física de la agricultura es casi 60 veces mayor que las superficies edificadas o pavimentadas de las ciudades.

También las aguas dulces han quedado maltrechas. Utilizamos la asombrosa cifra de 4000 kilómetros cúbicos de agua dulce al año, extraída, en su gran mayoría, de ríos y acuíferos. Los regadíos dan cuenta del 70 por ciento de esa extracción. Si se considera solo el consumo de agua (agua tomada y no devuelta a su cuenca), los riegos suponen el 80 o el 90 por ciento del total. En consecuencia, numerosos ríos han visto reducido su caudal, otros han desaparecido del todo y en muchos lugares el nivel freático se halla en franco declive.

El agua no solo se vuelve cada vez más escasa, sino también más contaminada. Abonos, herbicidas e insecticidas se emplean en cantidades excesivas y se detectan ya en casi todos los ecosistemas. Los flujos de nitrógeno y de fósforo se han duplicado holgadamente desde 1960, lo que ha provocado una contaminación acuática generalizada y enormes zonas «muertas», hipóxicas, en las desembocaduras de los mayores ríos del mundo [*véase* «Recuperación de zonas muertas», por Laurence Mee; Investigación y Ciencia, enero de 2007]. Irónicamente, los arrastres y lixiviados de fertilizantes llegados de tierra firme, aplicados en ella para producir más alimentos, ponen en peligro otras fuentes de nutrición clave: los caladeros de las franjas costeras. Es indudable que los abonos han desempeñado un papel decisivo en la revolución verde y han contribuido a alimentar al mundo. Pero cuando casi la mitad de ellos son arrastrados, en lugar de nutrir a los cultivos, obviamente hay que mejorar su aplicación.

La agricultura representa también la mayor fuente de emisiones de gases de efecto invernadero de origen antrópico. Contribuye, en conjunto, al 35 por ciento del dióxido de carbono,

EN SÍNTESIS

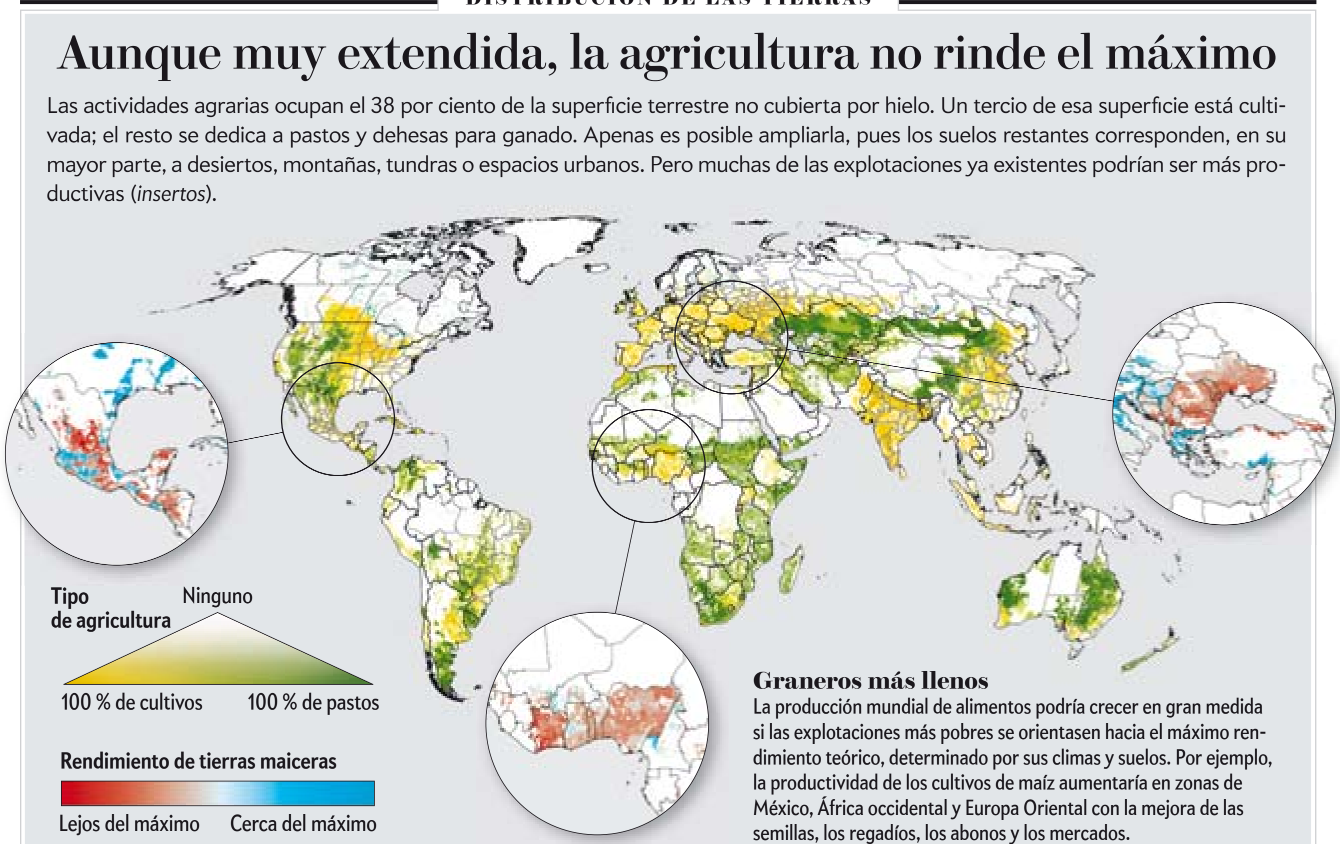
La humanidad debe resolver tres graves problemas alimentarios: terminar con las hambrunas, duplicar la producción de alimentos hacia 2050 y, al mismo tiempo, reducir la agresión de la agricultura sobre el ambiente.

Cinco estrategias, aplicadas de modo coordinado, podrían lograrlo: evitar la ocupación agrícola de más tierras tropicales; potenciar el rendimiento de las explotaciones menos productivas; emplear aguas y fertilizantes con mayor eficacia en todo el mundo; reducir el consumo de carne, y evitar las mermas y desperdicios en la producción y distribución de alimentos.

Un sistema de certificación de alimentos, centrado en su valor nutritivo, la garantía del suministro, y la reducción de costes sociales y ambientales, facilitaría la elección de productos que encaminasen la agricultura en una dirección más sostenible.

Aunque muy extendida, la agricultura no rinde el máximo

Las actividades agrarias ocupan el 38 por ciento de la superficie terrestre no cubierta por hielo. Un tercio de esa superficie está cultivada; el resto se dedica a pastos y dehesas para ganado. Apenas es posible ampliarla, pues los suelos restantes corresponden, en su mayor parte, a desiertos, montañas, tundras o espacios urbanos. Pero muchas de las explotaciones ya existentes podrían ser más productivas (*insertos*).



Graneros más llenos
La producción mundial de alimentos podría crecer en gran medida si las explotaciones más pobres se orientasen hacia el máximo rendimiento teórico, determinado por sus climas y suelos. Por ejemplo, la productividad de los cultivos de maíz aumentaría en zonas de México, África occidental y Europa Oriental con la mejora de las semillas, los regadíos, los abonos y los mercados.

CORTESÍA DE JAMES GERBER, INSTITUTO DEL MEDIOAMBIENTE, UNIVERSIDAD DE MINNESOTA (*mapas*)

metano y óxido nitroso lanzados a la atmósfera: más que la suma de todas las emisiones debidas al transporte (automóviles, camiones, trenes, barcos y aviones) o a la generación de energía eléctrica. La energía consumida para cultivar, procesar y transportar alimentos es sin duda preocupante, pero la inmensa mayoría de las emisiones proceden de la deforestación tropical, del metano liberado por animales y arrozales, y del óxido nitroso de suelos abonados en exceso.

CINCO SOLUCIONES

La agricultura moderna ha impulsado de modo extraordinario el desarrollo mundial. Pero no es posible seguir ignorando su limitada capacidad de expansión ni el creciente daño ambiental que impone. Los métodos aplicados para resolver los problemas alimentarios y ambientales resultan a menudo contradictorios. Si se desea aumentar la producción de alimentos despejando más tierra o utilizando más fertilizantes y agua, se perjudica a los ecosistemas. Por el contrario, si dedicamos esfuerzos para restaurar ecosistemas y abandonamos tierras hoy dedicadas al cultivo, se reduce la producción. Este planteamiento excluyente de «lo uno o lo otro» ya no es aceptable. Se necesitan soluciones integrales.

Tras meses de investigación y deliberación, a partir del análisis de los datos agrícolas y ambientales recién generados a escala planetaria, nuestro equipo ha perfilado un plan de cinco puntos para abordar de modo coordinado los problemas de la alimentación y el ambiente.

Detener la expansión de la agricultura. Nuestra primera recomendación consiste en frenar y, finalmente, abandonar la ampliación de la superficie agrícola, en especial en las selvas tropicales y en las sabanas. La destrucción de esos ecosistemas entraña enormes y graves repercusiones ambientales; sobre todo, la pérdida de biodiversidad y el aumento de las emisiones de dióxido de carbono (como consecuencia de la eliminación de la vegetación natural).

Si se frenara la deforestación se reduciría en gran medida la agresión al ambiente, sin que ello implicara una restricción importante de la producción mundial de alimentos. La consiguiente disminución de la capacidad agrícola podría compensarse evitando la urbanización, la degradación o el abandono de las tierras más aptas para el cultivo.

Se han formulado numerosas propuestas para mitigar la deforestación. Una de las más prometedoras es el mecanismo REDD (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación). Según este, los países ricos subvencionarían a los países tropicales para que protegiesen sus pluviselvas; en compensación, recibirían autorizaciones o créditos para emisiones carbónicas. Otras posibles actuaciones consistirían en desarrollar normas de certificación para productos agrícolas. Las cadenas de suministro podrían así tener la certeza de que los productos no han sido cultivados en tierras desforestadas. Parejamente, una política de biocombustibles más acertada, que dé preferencia a los cultivos comestibles sobre otros destinados a la obtención de energía permitiría aprovechar tierras agrícolas de vital importancia.

Eliminar las disparidades de rendimiento. Para duplicar la producción mundial de alimentos sin extender la superficie agrícola, es preciso potenciar la cosecha de los labradíos actuales. Caben dos opciones. Podemos mejorar la productividad de las mejores explotaciones (elevar su límite de rendimiento) mediante la modificación genética y la gestión de los cultivos. O bien,

podemos estimular el rendimiento de las tierras menos productivas y eliminar así la diferencia entre la cosecha actual y la que podrían proporcionar con una gestión más adecuada. Esta segunda opción ofrece las ventajas mayores y más inmediatas, sobre todo en las regiones que más sufren hambruna.

Al analizar la productividad de los cultivos, nuestro equipo ha apreciado una importante disparidad de rendimiento en gran parte del mundo. En numerosas zonas de África, América Central y Europa Oriental, las cosechas podrían aumentar de modo sustancial. Mediante el empleo de semillas más adecuadas, mejores abonos y sistemas de riego más eficientes se podrían obtener muchos más alimentos en las tierras ya existentes. De nuestros análisis se deduce que si se solucionase el déficit de rendimiento en los 16 tipos de cultivos más importantes del mundo, la producción de alimentos se incrementaría en un 50 o un 60 por ciento, con escasos daños ambientales.

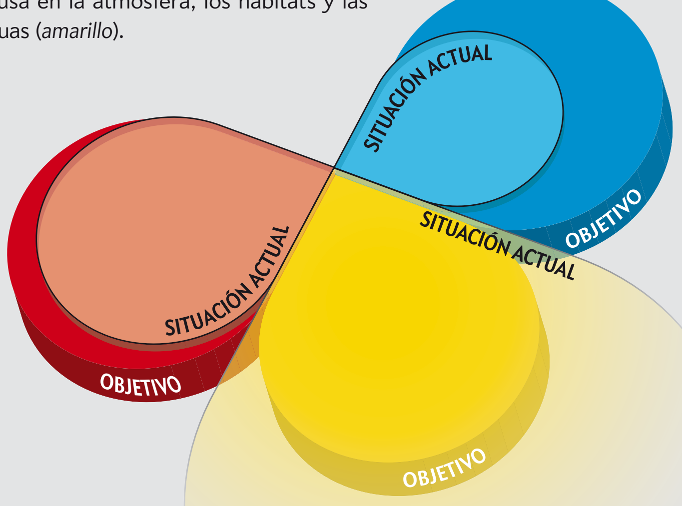
Aumentar la cosecha en las tierras agrícolas menos productivas exigirá a menudo aplicar más abono y más agua. Habrá que velar por que no se abuse del riego y los abonos sintéticos. Existen otros métodos para mejorar el rendimiento. La reducción del laboreo conlleva una menor alteración del suelo agrícola y mitiga la erosión. Los cultivos de cobertura, introducidos entre los cultivos de temporada, ponen coto a las malas hierbas y aportan al suelo nutrientes y nitrógeno, al ser volteados por el arado. Cabe adoptar también las enseñanzas de los sistemas orgánicos y agroecológicos, como el abandono de los restos de las cosechas en el campo para que, al descomponerse, lo nutran. Para eliminar la disparidad de rendimiento en el mundo, es preciso vencer también obstáculos sociales y económicos muy serios. Deberá mejorarse la distribución de fertilizantes y de variedades de simientes a las granjas de las regiones empobrecidas y, en muchos casos, abrirles accesos al mercado global.

ESTRATEGIA

Producir más, dañar menos

La agricultura, para dar de comer al mundo sin dañar el planeta, tendrá que producir mucho más (*azul*) y hallar medios de distribución más eficaces (*rojo*). Pero, al mismo tiempo, ha de reducir las alteraciones que causa en la atmósfera, los hábitats y las aguas (*amarillo*).

Producción
En 2050 la población mundial habrá aumentado en 2000 o 3000 millones de personas, pero el consumo lo hará en una proporción muy superior, a causa del mayor poder económico de muchos individuos. Será necesario duplicar la producción actual.



Acceso
Más de 1000 millones de los 7000 millones de habitantes del planeta padecen hambre crónica. Es necesario vencer la pobreza y la mala distribución de alimentos para que todos dispongan de una nutrición adecuada.

Daños ambientales
Para reducirlos, hay que detener la ocupación de los bosques tropicales, elevar la productividad de las tierras mal cultivadas (lo que podría incrementar la producción en un 50 o un 60 por ciento), hacer mejor uso de aguas y abonos, y evitar la degradación de los suelos.

JEN CHRISTIANSEN

Utilizar con mayor eficacia los recursos. Para paliar el impacto ambiental de la agricultura, deben aplicarse prácticas agrícolas mucho más eficientes, tanto en zonas de alto como de bajo rendimiento. Hay que aumentar con creces la cosecha por unidad de agua, abono y energía.

Para obtener una caloría de alimento se está utilizando, en promedio, alrededor de un litro de agua de regadío, y en algunos lugares, un volumen muy superior. Nuestro análisis apunta a que se podría limitar de forma importante el consumo de agua sin una gran repercusión en la producción, sobre todo en climas secos. Algunas de las técnicas principales consistirían en el riego por goteo (al aplicarse directamente agua en la base de las plantas, no se desperdicia como cuando se pulveriza en el aire); el recubrimiento de los suelos con materia orgánica para retener la humedad, y la contención de las pérdidas en los sistemas de regadío (mediante la reducción de la evaporación en albercas y canales).

En cuanto al empleo de abonos, existen dos tipos de problemas: algunas tierras no los reciben en cantidad suficiente, por lo que su producción es escasa; otras, los reciben en exceso y provocan contaminación. Casi nadie utiliza los abonos en su justa medida. A ese respecto, nuestro análisis ha identificado puntos «calientes» en el planeta, sobre todo en China, India septentrional, las llanuras centrales de Estados Unidos y Europa occidental. En todas esas regiones se podría reducir de modo sustancial la aplicación de abonos sin que ello repercutiera apenas en el rendimiento. Como sucede en otros aspectos de la actividad humana, solo el 10 por ciento de las tierras cultivadas del mundo generan del 30 al 40 por ciento de la contaminación por fertilizantes agrícolas.

Esas prácticas podrían corregirse mediante incentivos económicos y medidas políticas. Se podrían ofrecer subsidios a los agricultores por proteger y mantener las cuencas hídricas, reducir el uso de fertilizantes, mejorar la gestión de los purines (sobre todo, de su almacenamiento, para evitar fugas hacia los acuíferos en las tormentas o inundaciones), capturar y reciclar el exceso de nutrientes, y por otras prácticas ecológicas. Además, la restauración de los humedales aumentaría su capacidad de filtrar los nutrientes que están siendo arrastrados.

La reducción del laboreo puede contribuir también a nutrir el suelo, al igual que la agricultura de precisión (aplicación de agua y abonos en el momento y lugar más adecuados) y las técnicas de cultivo ecológico [*véase* «Agricultura sin labranza», por David R. Huggins y John P. Reganold; Investigación y Ciencia, septiembre de 2008].

Disminuir el consumo de carne. Si se dedicara una mayor parte de nuestras cosechas a alimentar directamente a las personas y una menor parte al engorde de ganado, la disponibilidad mundial de alimentos crecería de modo apreciable.

La humanidad dispondría de hasta $3 \cdot 10^{18}$ (tres trillones) de calorías más al año (un aumento del 50 por ciento respecto al suministro actual) si se siguiera una dieta estrictamente vegetariana. Sin duda, nuestra alimentación actual y el uso que damos a los cultivos nos aportan numerosos beneficios económicos y sociales, y nuestras preferencias difícilmente van a cambiar por completo. Aun así, pequeñas modificaciones en la dieta, como consumir carne de ave, cerdo o procedente de sistemas de ganadería extensiva, en lugar de vacuno engordado con grano, pueden ofrecer muy buenos resultados.

Reducir mermas y desechos. Por último, una recomendación evidente, a menudo desdeñada, consiste en reducir las mermas y desperdicios del sistema alimentario. Alrededor de un 30 por ciento de los alimentos producidos en el planeta se desechan, se pierden, se estropean o son consumidos por parásitos.

En los países ricos, gran parte de los desperdicios son producidos por el consumidor, en restaurantes y en cubos de basura. Sencillos cambios en las pautas diarias (evitar las raciones desmesuradas, cuyas sobras se desechan, y disminuir el número de comidas en restaurantes o para llevar) bastarían para reducir de forma notable los desperdicios, amén del perímetro de nuestra cintura. En los países más pobres, las pérdidas son de importancia similar, pero se originan en el productor, como consecuencia de malas cosechas, una conservación deficiente de los alimentos, o la carencia de infraestructuras o mercados que hagan llegar los productos a su destino. Las pérdidas descenderían de forma apreciable si se mejoraran los sistemas de almacenaje, conservación y distribución. Además, con instrumentos de comercialización más eficaces podría conectarse mejor la producción con la demanda. Así se está haciendo en África, donde la telefonía móvil permite poner en contacto a proveedores, intermediarios y compradores.

La eliminación total de las pérdidas que se producen desde la granja hasta el plato resulta poco realista, pero incluso pequeños progresos podrían ofrecer beneficios importantes. Esfuerzos concretos, en especial, un menor desperdicio de los alimentos que exigen mayores recursos, como los cárnicos y lácteos, supondrían importantes mejoras.

HACIA UN SISTEMA ALIMENTARIO EN RED

En principio, nuestro plan en torno a cinco ejes permitiría encarrilar numerosos problemas de suministro de alimentos y de agresión al ambiente. La disponibilidad de alimentos aumentaría de un 100 a un 180 por ciento sobre la actual, al tiempo que se mitigarían las emisiones de gases, las pérdidas en biodiversidad, y el consumo y contaminación de las aguas.

Insistimos en que estas cinco propuestas —y tal vez otras más— han de aplicarse de modo conjunto. No es posible resolver todos los problemas con una única estrategia. Los avances logrados por la revolución verde y la agricultura industrial servirán de cimientos, además de las innovaciones de la agricultura ecológica y de los sistemas alimentarios locales. Adoptemos las ideas más certeras e incorporémoslas a una nueva metodología: un sistema alimentario sostenible, centrado en la eficacia nutricional, social y ambiental; una producción responsable de alimentos que alcance las economías de escala.

Ese nuevo sistema podría configurarse a partir de una red de sistemas agrícolas locales, adaptados al clima, recursos hídricos, ecosistemas y cultura de la zona, que se conectarían entre sí mediante una estructura eficiente de transporte y distribución. Un sistema tal resultaría robusto, y a la vez ofrecería a los agricultores y granjeros la debida compensación por su trabajo.

Un mecanismo que potenciaría este nuevo sistema alimentario sería el equivalente del programa LEED (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental), que está siendo aplicado para la construcción de edificios comerciales sostenibles. El programa concede certificados de calificación creciente, por asignación de puntos adicionales si se incorporan a la obra técnicas ecológicas, como energía solar, iluminación eficiente, materiales de construcción reciclados o escasa generación de escombros de construcción.

Para lograr una agricultura sostenible, los alimentos recibirían puntos según su valor nutritivo, las garantías de suministro y otros beneficios públicos; de ellos se detraerían puntos por costes sociales y ambientales. Esta certificación mejoraría los etiquetados actuales de los productos, como «ecológico» o «local», que no nos informan sobre lo que vamos a comer. Tendríamos, en cambio, una evaluación más exhaustiva de nuestros alimentos, que atendería a sus dimensiones nutritivas, sociales y ambientales, y permitiría ponderar los pros y contras de los diferentes métodos de producción agraria.

Imaginemos las posibilidades: cítricos y café sostenibles de los trópicos, cereales sostenibles de las zonas templadas, así como hortalizas y tuberosas locales, cultivados todos ellos con normas claras y orientadas a lograr buenas cosechas. El consumidor, con su teléfono inteligente y la última aplicación sobre alimentos sostenibles, podría conocer el origen de los productos, quiénes y cómo los cultivaron, y la calificación que merecen según diversos criterios: nutritivos, sociales y ambientales. Y cuando descubriese productos satisfactorios, podría comunicarlo mediante su red social a cultivadores y aficionados a la gastronomía.

Los principios y prácticas de nuestros diversos sistemas agrícolas (desde las grandes redes comerciales hasta los sistemas locales y ecológicos) constituyen la base para afrontar las necesidades mundiales de alimentación y atención al ambiente. Alimentar a 9000 millones de personas de modo sostenible representará uno de los más grandes retos que se le han planteado a la civilización. Exigirá imaginación, determinación y duro esfuerzo de un sinfín de personas en todo el mundo. No hay tiempo que perder.

PARA SABER MÁS

Global consequences of land use. Jonathan A. Foley et al. en *Science*, vol. 309, págs. 570-574, 22 de julio de 2005.

Enough: Why the world's poorest starve in an age of plenty. Roger Thurow y Scott Kilman. Public Affairs, 2010.

Food security: The challenge of feeding 9 billion people. H. Charles J. Godfray et al. en *Science*, vol. 327, págs. 812-818, 12 de febrero de 2010.

Solutions for a cultivated planet. Jonathan A. Foley et al. en *Nature*, vol. 478, 20 de octubre de 2011.

Otros mapas que ilustran el modo de aumentar la producción de alimentos y reducir el impacto ambiental de la agricultura: **ScientificAmerican.com/nov2011/foley**



FOTOGRAFÍA DE DAVID LIITTSCHWAGER

BIOTECNOLOGÍA

EL GEN DESTRUCTOR

Una nueva variedad de mosquitos transgénicos porta un gen que deja incapacitada su propia descendencia. Podría aniquilar las poblaciones locales de mosquitos e impedir la propagación de enfermedades. Algunos de ellos ya se han liberado al ambiente de forma secreta

Bijal P. Trivedi

Zumbido mortal: El mosquito *A. aegypti* es el principal portador del dengue.

Bijal P. Trivedi es periodista especializada en biología, medioambiente y medicina. Estudió biología molecular y bioquímica en la Universidad Oberlin y en la Universidad de California en Los Ángeles.



AFUERAS DE TAPACHULA, ESTADO DE CHIAPAS, A 17 KILÓMETROS DE GUATEMALA.

Para llegar a las jaulas, seguimos la autopista principal que sale del pueblo y conducimos a lo largo de las plantaciones de soja, coco, plátanos y mangos de color verde oscuro que crecen en el rico suelo volcánico. Tras pasar el diminuto pueblo de Río Florido, la carretera degenera hasta convertirse en un sendero ondulado y polvoriento. Llegamos por fin a un puesto de control de seguridad, ocupado por un guardia. Una señal colocada sobre un alambrado de púas que rodea el complejo muestra un mosquito flanqueado por un hombre y una mujer. En ella se lee: «Estos mosquitos genéticamente modificados requieren un manejo especial. Nosotros jugamos limpio».

En el interior, unos anacardos rodean un grupo de jaulas fabricadas con tela de malla colocadas sobre una plataforma. Las jaulas contienen miles de mosquitos *Aedes aegypti* (la especie local, más pequeña y silenciosa que el mosquito común que se extiende por Europa y otras regiones). Ofrecen una imagen algo etérea: los rayos de sol se filtran a través de las mallas y crean una luz amarilla resplandeciente. Sin embargo, en el interior de las jaulas los mosquitos transgénicos libran un combate a muerte contra los locales, un «genocidio por apareamiento» intencionado que podría erradicar el dengue, una de las enfermedades más problemáticas y agresivas del mundo.

A lo largo de una franja de países tropicales y subtropicales, cuatro tipos de virus del dengue, estrechamente emparentados entre sí, infectan a alrededor de 100 millones de personas cada año y causan un amplio espectro de trastornos, como síntomas gripales, hemorragias internas, *shock* e incluso la muerte. No hay vacunas ni curas contra ese mal. Al igual que con otras enfermedades transmitidas por mosquitos, la estrategia principal de los servicios de salud consiste en evitar que los mosquitos piquen a las personas. Con ese objetivo, las autoridades intentan hacer desaparecer de los barrios las aguas estancadas donde se crían los dípteros: rocían insecticidas y distribuyen mosquiteras y otras barreras rudimentarias contra los insectos. Su propósito es contener la plaga, no vencerla.

Sin embargo, Anthony James, biólogo molecular de la Universidad de California en Irving, está preparando una estrategia ofensiva. Él y sus colegas han introducido en *A. aegypti* genes que bloquean el desarrollo de los músculos del vuelo en las hembras. Cuando un macho transgénico se aparea con una hembra silvestre, transmite a la descendencia sus genes modificados. Las hembras, las que pican, no sobreviven durante mucho tiempo. Cuando salen del estado de pupa permanecen en el agua, inmóviles. No volarán ni se aparearán ni propagarán la enfermedad. Por el contrario, la progenie masculina vivirá para diseminar su semilla mortífera. Con el tiempo, la ausencia de una descendencia femenina debería llevar al exterminio de la población, algo que el colaborador de James ya ha demostrado en el ambiente controlado de un laboratorio en Colorado. Ahora se ha traído sus insectos al sur.

Esa técnica representa la primera con la que se ha modificado genéticamente un organismo para exterminar una población nativa e impedir así la transmisión de una enfermedad. Si los mosquitos transgénicos vencen a los locales, su liberación en cualquier región del mundo donde el dengue sea endémico podría evitar el sufrimiento a decenas de millones de personas. Sin embargo, quienes se oponen al plan avisan de las imprevisibles consecuencias, aunque sean los mosquitos los que las vayan a padecer.

Los investigadores se afanan por hallar el modo de poner a prueba sus creaciones. No existen leyes o agencias internacionales que regulen los ensayos con nuevos organismos transgénicos. En la mayoría de los casos, los científicos y las compañías biotecnológicas tienen libertad de acción, incluso pueden llevar a cabo liberaciones incontroladas de organismos en fase de prueba en países en vías de desarrollo, sin pedir permiso o siquiera avisar a los habitantes.

EN SÍNTESIS

Mediante ingeniería genética, se han modificado mosquitos para dotarlos de un mecanismo de autodestrucción, un avance que podría ralentizar la propagación de enfermedades transmitidas por mosquitos.

Un equipo de científicos ha estado llevando a cabo experimentos con los mosquitos en jaulas en el sur de México. Otro ha estado liberando mosquitos al ambiente.

La liberación intencionada de insectos transgénicos ha generado controversia en todo el mundo, sobre todo porque las primeras operaciones se realizaron en secreto.



Compañeros letales: En jaulas construidas en el sur de México, los científicos introducen mosquitos transgénicos junto a un grupo de mosquitos locales. Los intrusos deberían exterminar la población nativa.

James intenta jugar limpio desde años. Ha trabajado con los líderes de las comunidades en Tapachula y ha adquirido propiedades mediante el programa tradicional para el reparto de la tierra. Allí ha construido unas instalaciones seguras para realizar los ensayos, una tarea ardua, lenta y meticulosa. Pero no es el único que realiza experimentos con mosquitos transgénicos fuera del laboratorio. El colega de James, Luke Alphey, fundador de la compañía biotecnológica Oxitec, con sede en el Reino Unido, ha llevado a cabo en silencio una estrategia más agresiva. En 2009 y 2010, su organización se aprovechó de la escasa reglamentación existente en la isla caribeña del Gran Caimán para liberar millones de mosquitos modificados al medio natural. James se enteró de los experimentos cuando Alphey los hizo públicos en un congreso en Atlanta en 2010, catorce meses después de ponerlos en marcha. Desde entonces, Oxitec ha seguido con los ensayos, con la introducción de mosquitos transgénicos en Malasia y en Brasil.

Los expertos temen que las actividades de Oxitec desencadenen una reacción violenta contra todos los insectos modificados genéticamente —igual que sucedió con el rechazo de Europa hacia los cultivos transgénicos—, movimiento que podría acabar con la nueva estrategia antes de poder entender en profundidad tanto sus promesas como sus posibles consecuencias.

Algo que resultaría inaceptable, dado el enorme potencial que presenta la técnica. El ensayo de Colorado demostró que los mosquitos modificados prosperan en un ambiente controlado, aunque unas pocas jaulas en un entorno cerrado no pueden compararse con la agreste naturaleza de Centroamérica, Brasil o Malasia. Para combatir la enfermedad y la mortalidad causadas por el mosquito, las creaciones de los científicos deben trasladarse a la jungla.

ESTERILIZACIÓN FORZADA

En 2001, James ya era un pionero en el campo de la genética molecular de los mosquitos; había sido el primero en modificar genéticamente un mosquito y en clonar un gen del insecto. Ese año decidió aplicar sus conocimientos al problema de la transmisión de enfermedades. Se preguntó si podría idear una estrategia, mediante el empleo de mosquitos, que sirviera para controlar las plagas agrícolas.

Un año antes, Alphey, a la sazón en la Universidad de Oxford, había desarrollado una técnica para generar moscas de la fruta portadoras de genes que mataban de manera selectiva a las hembras. La estrategia del control de poblaciones representa la versión postgenómica de la técnica de esterilización de insectos que durante 60 años ha permitido erradicar plagas de los cultivos. Consiste en criar un enorme número de insectos y esterilizar a los machos mediante ráfagas de radiación. Cuando se aparean con las hembras en los campos de la localidad, la unión no produce descendencia. El método no utiliza insecticidas, va dirigida únicamente contra la especie que provoca la plaga y ha sido aplicada con éxito en numerosas ocasiones. Tal fue el caso del programa a gran escala para eliminar la mosca de la fruta mediterránea (*Ceratitis capitata*) en Tapachula, en 1977.

Por desgracia, ese método nunca ha funcionado en los mosquitos. La radiación debilita gravemente los machos adultos y los procesos de selección y transporte los matan antes de que puedan aparearse. Sin embargo, la técnica de Alphey aplicada a los mosquitos permitiría obtener machos estériles viables a partir de la manipulación del genoma.

Para eliminar las hembras de mosquito (las que chupan la sangre y propagan la enfermedad), James debía modificar una región genética que solo ellas utilizaran. En 2002, él y Alphey identificaron un interruptor natural que controlaba el desarrollo de los músculos del vuelo en las hembras. Si este se desactiva, no se forman. Las hembras que surgen del estado de pupa permanecen inmóviles en la superficie del agua, sin poder volar, por lo que tampoco pueden atraer a los machos. Se trataba de una región idónea sobre la que actuar.

En 2002, Alphey fundó Oxitec para desarrollar la técnica. En 2005, la Fundación para el Instituto Nacional de la Salud, financiada en su mayor parte por la Fundación Bill y Melinda Gates, concedió a James 20 millones de dólares para investigar estrategias genéticas contra el dengue. James dio a Oxitec 5 millones de dólares para crear los mosquitos.

Los colaboradores diseñaron un segmento de ADN que constaba de un conjunto de genes y de las secuencias reguladoras que los activaban o desactivaban en el momento oportuno. El sistema funciona como un equipo de relevos. Durante la metamorfosis del mosquito desde el estadio larvario hasta el adulto, los interruptores específicos de las hembras se ponen en marcha y activan el primer gen, que produce una proteína. Esta acciona otro interruptor que moviliza al segundo gen, el cual sintetiza una toxina que destruye los músculos del vuelo de las hembras. Los investigadores añadieron también genes codificadores de proteínas fluorescentes para que las larvas modificadas adquiriesen un color rojo y verde brillante, lo que permitía seguir la propagación de los genes a través de la población.

Para criar grandes poblaciones de un mosquito programado exprofeso para que muriera, Alphey y James necesitaban una forma de proteger a las hembras del conjunto de genes tóxicos hasta después de que se hubiesen reproducido. El truco consistía en añadir al agua unas gotas de un antídoto, el antibiótico tetraciclina, que bloqueara la síntesis de la proteína que dañaba los músculos del vuelo. La estrategia constituye también un mecanismo de seguridad para casos de emergencia: si se esca-

pan unos pocos mosquitos transgénicos, en ausencia del fármaco, estos no llegan a reproducirse.

Los primeros ensayos con la nueva variedad tuvieron lugar en 2008 y 2009, cuando Megan Wise de Valdez, colaboradora de James que por aquel entonces trabajaba en la Universidad estatal de Colorado, introdujo machos modificados en una población de mosquitos *A. aegypti* normales en su laboratorio. En cinco meses, la población fue exterminada. El interruptor destructor funcionó. El siguiente paso consistía en llevar los mosquitos transgénicos al campo.

LOS ESTRAGOS DEL DENGUE

En Tapachula, donde James ha instalado su laboratorio rodeado de telas de malla, el dengue ha representado un problema durante mucho tiempo, al igual que en gran parte de México. Constituye la preocupación más importante en el día a día de Hermilo Domínguez Zárate, subsecretario de salud del estado de Chiapas, ya que la enfermedad se propaga de manera explosiva y causa los mayores estragos en las áreas densamente pobladas.

Durante mi viaje a Chiapas visité Pobres Unidos, una barriada empobrecida de las afueras de Tapachula que registró el mayor número de casos de dengue en 2009 y en 2010, junto con Janine Ramsey, parasitóloga del equipo de James que dirige el laboratorio de campo, y Rogelio Danis-Lozano, médico epidemiólogo.

Uno de los hogares que visitamos, al igual que la mayoría en Pobres Unidos, solo poseía tres paredes, como en un decorado cinematográfico. No había forma de mantener a los mosquitos fuera de la casa. El suelo sucio y empapado creaba un ambiente húmedo que atraía a los insectos. Montones de basura y docenas de contenedores que recogían el agua de lluvia ofrecían a los mosquitos innumerables sitios donde depositar sus huevos.

Danis-Lozano nos mostró una gran bañera de color amarillo rebosante de agua dulce, donde cientos de larvas de mosquito, semejantes a delgados hilos negros, nadaban vigorosamente en zigzag. Los habitantes de la casa conocían el dengue, por supuesto, pero Danis Lozano descubrió que ignoraban que las larvas de la bañera se convertían, tras la metamorfosis, en los mosquitos que propagaban la enfermedad.

Esa escena se repite en barriadas pobres y superpobladas de todo el mundo. Más de cien países padecen el dengue, sobre todo en Asia, África y las dos Américas. La forma suave de la enfermedad, «la fiebre rompehuesos», provoca síntomas parecidos a los de la gripe: fiebre, dolores musculares y articulares, y cefaleas intensas que duran alrededor de una semana. Una segunda infección puede desencadenar la fiebre hemorrágica del dengue, potencialmente mortal, que causa vómitos, fuertes calambres abdominales y hemorragias internas que afectan a los ojos, nariz, boca y vagina. Si no se trata, el dengue hemorrágico ocasiona la muerte al 20 por ciento de sus víctimas; con costosos tratamientos médicos, la mortalidad desciende hasta el 1 por ciento. La cifra anual de fallecimientos en el mundo supera la del resto de las fiebres hemorrágicas víricas juntas, incluidas las de los virus Ébola y Marburg.

En 2008, el epidemiólogo David M. Morens y Anthony S. Fauci, director del Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas de EE.UU., avisaron de que el dengue representaba una de las infecciones reaparecidas más agresivas del mundo. La frecuencia y la magnitud de los brotes han venido aumentando debido al creciente número de viajes internacionales y al éxodo de personas hacia las ciudades. Desde los años setenta del siglo XX, el número de afectados se ha duplicado cada década. En 2009, los responsables de salud pública de Florida informaron sobre los primeros casos de dengue en el estado después de siete decenios, lo que hizo surgir entre los epidemiólogos el temor de que la enfermedad arraigara pronto en los Estados Unidos continentales.

Una de las razones por las que James decidió aplicar su técnica para combatir el dengue (y no la malaria, por ejemplo) es que el virus lo transmite principalmente una sola especie de mosquito. (Entre 30 y 40 especies de mosquito son portadoras de la malaria.) *A. aegypti*, el principal vector de dengue en el mundo, es una especie africana que habita en los árboles. Se convirtió en especie invasora tras viajar en los barcos de esclavos, hace unos 400 años, y hoy vive en el medio urbano, donde se cría en cualquier cavidad que acumule una pequeña cantidad de agua limpia. Debido a que pica durante el día, los mosquiteros apenas sirven de protección. Y ataca casi exclusivamente a los humanos, de los que extrae los nutrientes que le permiten vivir alrededor de un mes, tiempo más que suficiente para picar y propagar la enfermedad.

A. aegypti actúa con sigilo. Carece del zumbido agudo y desesperante que provoca el deseo de aplastarlo o ahuyentarlo. En el criadero de insectos del Centro Regional de Investigación sobre la Salud Pública de Tapachula apenas podía oír al enjambre de mosquitos transgénicos que había en una pequeña jaula. Laura Valerio, entomóloga de la Universidad de California en Davis, introdujo su mano enguantada para señalar una hembra. La intrusión asustó a los machos, que emprendieron el vuelo y se dispersaron zumbando por toda la jaula. Las hembras, sin embargo, simplemente se quedaban quietas o se alejaban torpemente dando saltitos.

Las larvas de mosquito transgénicas se trasladarían más tarde al laboratorio de campo de James, formado por cinco pares de jaulas. Cada par consta de una jaula de control con mosquitos silvestres y una jaula de tratamiento en la que se mezclan los insectos modificados con los locales. Las distintas jaulas se hallan rodeadas de múltiples capas de tela de malla (una medida de protección para impedir las fugas) que los investigadores deben atravesar con cuidado a medida que van añadiendo nuevos sujetos de estudio al experimento.

Con ese estricto protocolo se pretende evitar errores del pasado. Durante mucho tiempo, los países en vías de desarrollo han representado un lugar idóneo para los ensayos de campo de los países del primer mundo. Pero una actitud desdeñosa hacia el ambiente local ha dado lugar a una reacción negativa que ha desbaratado programas enteros de investigación. Quizá no exista un campo donde se hayan producido más abusos, tanto reales como figurados, que en el de los organismos transgénicos.

VENENO EN LOS POZOS

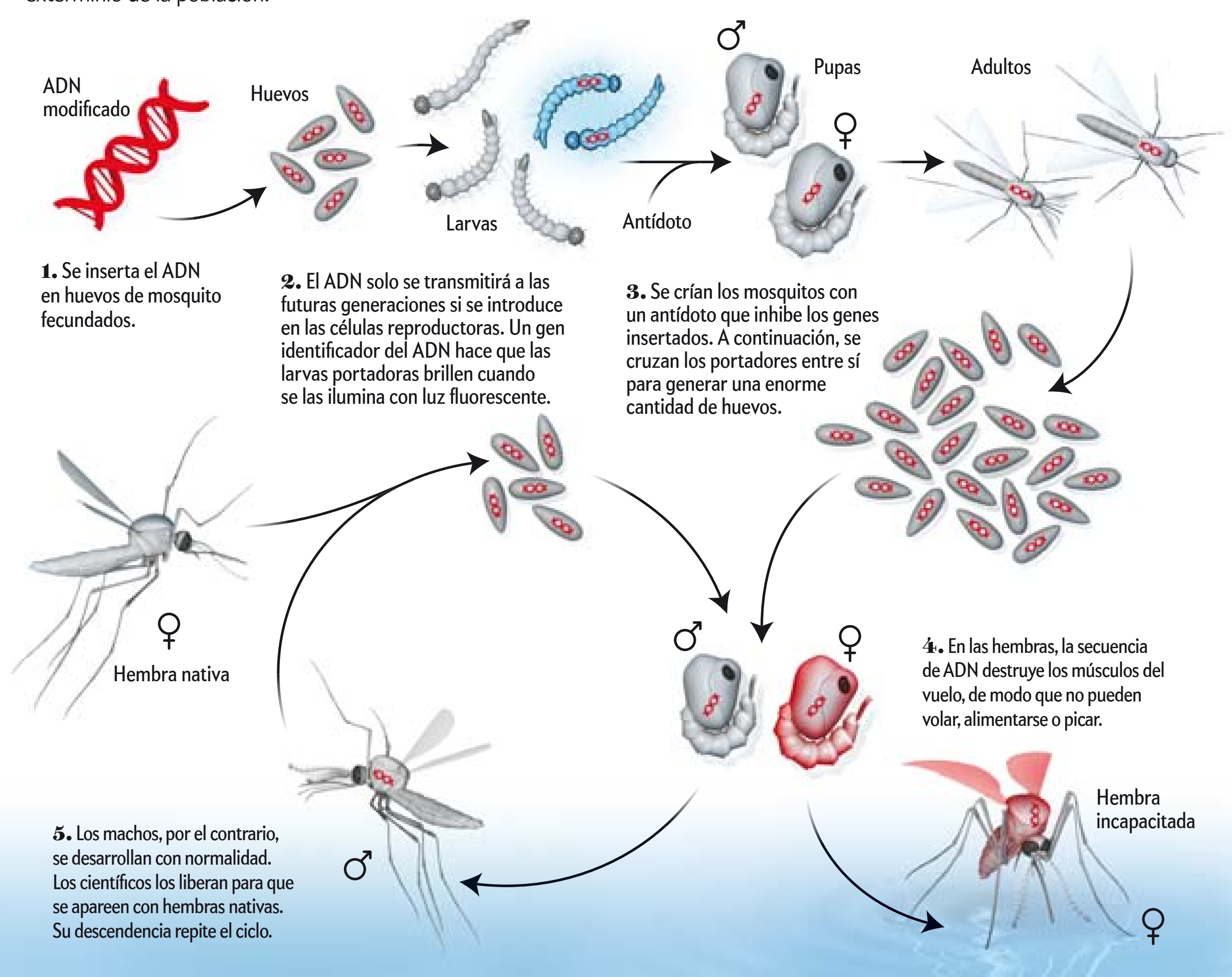
En 1969, la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el gobierno indio formaron un equipo para estudiar el control genético de tres especies de mosquito: *Culex fatigans*, que propaga las filarias (parásitos que provocan la elefantiasis); *A. aegypti*, que transmite el dengue y la fiebre amarilla; y *Anopheles stephensi*, que difunde la malaria. El gobierno de los Estados Unidos financió parte de las investigaciones.

En 1972, un científico escribió un artículo anónimo en el periódico *National Herald* de la India en el que afirmaba que algunos investigadores habían estado introduciendo mosquitos tratados con tiotepa (un derivado del gas mostaza que provoca defectos congénitos y cáncer en animales) en los pozos de agua potable de algunos pueblos. Los responsables del proyecto pu-

ASÍ FUNCIONA

Un interruptor que elimina las hembras

Los mosquitos transgénicos de México han sido diseñados para diezmar las poblaciones locales de la especie. La técnica introduce una secuencia genética en los huevos de mosquito que destruye los músculos del vuelo de las hembras. Se deja que los machos (que no pican) se dispersen por el ecosistema natural y transmitan sus genes incapacitantes. Con el tiempo, la falta de hembras da lugar al exterminio de la población.



blicaron una tímida réplica y declinaron las posteriores solicitudes de entrevistas por parte de la prensa. Después, en 1974, la agencia de noticias Press Trust de la India divulgó una historia encabezada por un titular incendiario: «La OMS realiza en la India investigaciones secretas para EE.UU.». El artículo exponía que el proyecto de los mosquitos ensayaba la viabilidad de *A. aegypti* como arma biológica. Afirmaba que se estaba empleando la India para investigar compuestos químicos o métodos no autorizados en los países patrocinadores. Y añadía que se estaba estudiando *A. aegypti* porque sus huevos (a diferencia de los de otros mosquitos) se podían secar, poner en un trozo de papel dentro de un sobre y mandarlos por correo a cualquier parte donde pudieran eclosionar. Aunque los investigadores negaron enérgicamente las acusaciones, la debacle producida en las relaciones públicas obligó a la OMS a abandonar el programa.

Desde entonces, se ha rehuido emprender ensayos de campo con organismos transgénicos, apunta Stephanie James (sin parentesco con Anthony), directora de la Iniciativa para Grandes Retos en Salud Global de la Fundación para los Institutos Nacionales de la Salud de EE.UU. «Había una barrera psicológica real. Se sabía que no estaba permitido fallar.»

«A lo largo de mi carrera me habían repetido que nunca encontraría a nadie que aceptara mi proyecto», me comentó Anthony James. En la cena inaugural de 2005 destinada a los beneficiarios de una subvención de la Iniciativa Grandes Retos, pidió consejo a Jim Lavery, del Centro para la Investigación de la Salud Global en el Hospital St. Michael de Toronto, especialista en participación comunitaria. «A la gente le asustan los transgénicos», le espetó James. «¿Qué se puede hacer entonces para que la comunidad se implique?».

Lavery sugirió seleccionar una zona donde el dengue representase un asunto de seguridad pública y donde los métodos de control estuviesen fracasando; en un país con una estructura reglamentaria rigurosa y compleja, capaz de evaluar los riesgos y los beneficios de un mosquito transgénico contra el dengue. De ese modo, la población confiaría en que la iniciativa no les

EMILY COOPER

iba a poner en peligro ni se aprovecharía de ellos. Él y el veterano en los ensayos de campo Thomas Scott, de la Universidad de California en Davis, ayudaron a James a formar un equipo internacional de ecólogos especializados en mosquitos, antropólogos y expertos en ética mucho antes de obtener los suficientes mosquitos para comenzar los ensayos.

En 2006, Tapachula representaba la mejor elección para llevar a cabo los ensayos. México contaba con leyes nacionales sobre los organismos genéticamente modificados y había firmado el Protocolo de Cartagena sobre Bioseguridad (la normativa internacional para su importación). Según Lavery, la experiencia con la mosca mediterránea significaba que a la comunidad de Tapachula no le asustaba la idea de un insecto transgénico.

«Al principio, la solicitud de tierras nos parecía insólita», comentaba Martiniano Barrios Matute, cultivador de soja y líder de la comunidad de granjeros en donde tiene lugar el experimento. ¿Para qué querría nadie construir grandes jaulas y llenarlas con mosquitos creados por el hombre? La población también mostraba confusión sobre los posibles efectos de los mosquitos transgénicos. Si alguno se escapaba, ¿podría dañarles a ellos o a sus campos? ¿Transferirían su esterilidad a otros insectos?

El grupo de James tuvo en cuenta las preocupaciones de la comunidad y compraron el terreno para construir las jaulas mediante el programa comunal tradicional para la adquisición de tierras en la región. Y siguen involucrando a la población local a medida que el experimento avanza.

En una asamblea municipal que se celebra semanalmente en la Casa de la Cultura ubicada en la histórica plaza principal de Tapachula, Ramsey, la directora del laboratorio de campo, describió el proyecto a una audiencia formada por los líderes de la comunidad, treinta hombres y cinco mujeres. Cuando terminó, le formularon con prudencia algunas preguntas. Un hombre pidió si podría visitar las jaulas de los mosquitos. Otro inquirió qué pasaría si los mosquitos se escapaban. Una mujer joven preguntó por qué la gente rechazaba los transgénicos. Un anciano de un pueblo de las montañas deseaba saber si la malaria y el dengue eran distintos. Ramsey contestó a todos ellos y, después, sonrieron y le dieron la mano cuando se fue.

«Ahora que lo comprendemos, el proyecto nos gusta aún más», comentaba Barrios Matute. «No solo beneficiará a Río Florido sino a sus alrededores, a México y a otras partes del mundo.»

LA GRAN EVASIÓN

Mientras en México se realizaba ese lento trabajo científico y con la comunidad, Alphey había adoptado con sigilo una estrategia totalmente distinta. El pasado noviembre se presentó en el congreso anual de la Sociedad Americana de Medicina Tropical e Higiene con una sorprendente información. Según Alphey, Oxitec había estado liberando mosquitos transgénicos en la isla caribeña de Gran Caimán desde septiembre de 2009. (Los mosquitos empleados eran parecidos, aunque no idénticos, a los que se ensayaban en Tapachula; en la cepa de las islas Caimán, los machos y las hembras mueren en el estado larvario.) El científico reveló que, entre mayo y octubre de 2010, Oxitec había liberado más de tres millones de mosquitos macho, lo que había reducido la población indígena de *A. aegypti* en un 80 por ciento. Los datos ya se habían enviado para su publicación.

Alphey defendió su impetuosa operación y afirmó que Oxitec dejaba casi todo el asunto de la cobertura mediática en manos de los gobiernos, los que mejor comprendían la sensibilidad cultural del país. En Gran Caimán, la cobertura consistió en un anuncio de cinco minutos en el telediario local de la noche y un panfleto que describía los mosquitos como estériles, sin ninguna mención a la modificación genética. No hubo reuniones públicas u ocasiones para que los residentes expresaran sus preocupaciones.

Mark Q. Benedict, biólogo molecular de la Universidad de Perugia y consultor de la Fundación Gates, declara que Oxitec no ha infringido ninguna ley y define los ensayos de las islas Caimán como «valientes». Afirma que las noticias confusas y contradictorias ofrecidas por los medios de comunicación difundieron la imagen de un científico solitario que liberaba al entorno mosquitos sin ningún tipo de precaución, lo cual desmiente. Oxitec trabaja con los gobiernos locales y nacionales para conseguir la aprobación antes de llevar a cabo ningún ensayo de campo.

Aun así, la liberación de mosquitos en las islas Caimán ha provocado intensas reacciones (desconfianza, decepción y frustración) en numerosos colegas de Alphey, en grupos ecologistas y en el público en general. A la comunidad internacional le pilló por sorpresa esa operación, comenta Bart Knols, entomólogo médico de la Universidad de Ámsterdam y director ejecutivo de MalariaWorld. «Ahora, el mundo percibe a Oxitec como una compañía hermética, lo que genera sospechas en la opinión pública.»

Knols opina que se trata de una técnica prometedora. Pero si algún grupo provoca un embrollo y desinforma a la población, se corre el riesgo de que otros ensayos con transgénicos paguen las consecuencias. Hoy en día, por culpa de Oxitec, añade, tenemos los mismos problemas que tuvo la OMS en India en 1976.

Otros expertos afirman que la compañía se está aprovechando de países que poseen una mínima burocracia y legislación. En las islas Caimán, Oxitec llevó a cabo sus ensayos en un lugar con una estructura reglamentaria permisiva, comenta Stephanie James, donde un proyecto de ley de bioseguridad se hallaba aún pendiente de aprobación.

Otra de las liberaciones se realizó en Malasia. En diciembre de 2010, en medio de las protestas de más de una veintena de organizaciones sin ánimo de lucro, Oxitec puso en marcha un ensayo en una región deshabitada. Todavía hay que hacer un estudio de seguimiento en un pueblo cercano. Incluso con un recién creado Consejo de Bioseguridad Nacional que monitoriza los organismos modificados y con la normativa del Acta Malaya de Bioseguridad de 2009, muchos piensan que el país carece de experiencia para supervisar el experimento, afirma Gurmit Singh, director del Centro para el Medioambiente, Tecnología y Desarrollo de Malasia, una organización sin ánimo de lucro.

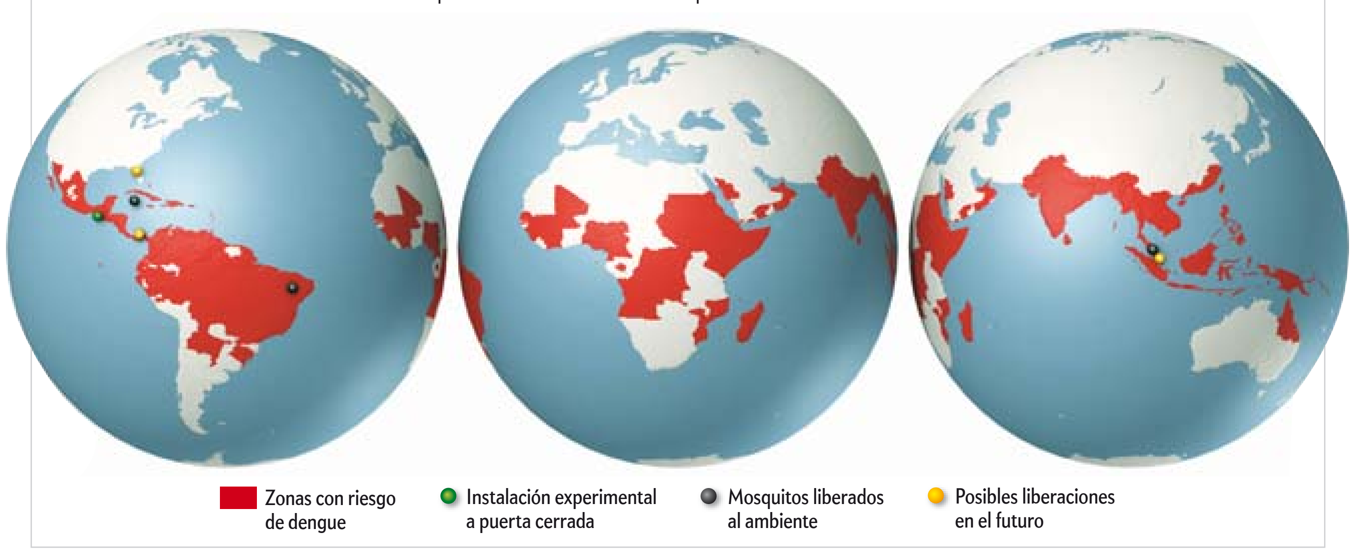
Anthony James se desplomó en una silla mientras discutíamos la situación, pero muy diplomático, como siempre, dijo con rotundidad: «Ese es el problema de trabajar con corporaciones. No puedo controlar a los socios corporativos». James afirmó que la estrategia de Oxitec resultaría imposible en México. Pero confía en que las actividades llevadas a cabo por su equipo para involucrar a la comunidad hayan marcado un estándar para los ensayos con organismos transgénicos.

Alphey no se inmuta. A principios del pasado año puso en marcha un ensayo de seis meses de duración en un suburbio pobre de Juazeiro, Bahía, en el norte de Brasil, lugar donde los mosquitos y el dengue se propagan durante todo el año. Este mismo año, Alphey tiene planeado volver a Gran Caimán para enfrentar las cepas de mosquitos transgénicos de Tapachula y de las islas Caimán con los mosquitos locales. Desea compro-

DISTRIBUCIÓN MUNDIAL

¿Dónde hay dengue?

El dengue es la enfermedad vírica transmitida por mosquitos que se extiende con mayor rapidez en el mundo. Alrededor de 2500 millones de personas habitan en países donde el dengue es endémico, y el número de casos declarados a la Organización Mundial de la Salud se ha estado duplicando cada década. Algunos investigadores han señalado que la liberación de mosquitos transgénicos en el ambiente ha reducido drásticamente las poblaciones locales de la especie.



FUENTE: *CDC HEALTH INFORMATION FOR INTERNATIONAL TRAVEL 2012*, CENTROS PARA EL CONTROL Y PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES, OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2012 (*zonas con riesgo de dengue*)

bar cuál vive más, vuela más lejos y se aparea mejor con las hembras locales. Los responsables del control de mosquitos de Panamá y Filipinas han manifestado interés en la técnica, al igual que las autoridades de Florida.

PROPAGACIÓN PERMANENTE

Por supuesto, muchos se oponen a la liberación de cualquier tipo de organismo transgénico, con independencia de las consideradas explicaciones de los científicos. Janet Cotter, investigadora principal de los laboratorios de Greenpeace, avisa del enorme peligro que conllevan las operaciones de Oxitec con mosquitos transgénicos. La esterilidad absoluta no existe, con lo que se soltarán algunas hembras fértiles con consecuencias impredecibles en el entorno.

Algunos se preguntan si resulta ético o seguro eliminar un organismo, aunque solo se haga en un área geográfica reducida. Los partidarios argumentan que *A. aegypti* es una especie invasora que ha evolucionado para explotar un único nicho humano. «El mosquito urbano no forma parte de ninguna cadena alimentaria importante», afirma Phil Lounibos, ecólogo especialista en mosquitos del Laboratorio de Entomología Médica de Florida. Aun así, Lounibos no tiene claro que eliminando A. *aegypti* se detenga la transmisión del dengue de forma permanente. «Una campaña anterior para erradicar el mosquito de las dos Américas, realizada en los años cincuenta y sesenta del siglo xx, cuando la especie representaba el principal vector de la fiebre amarilla urbana, fracasó estrepitosamente», comenta [*véase* «El dengue en Latinoamérica», por Jorge R. Rey y L. Philip Lounibos, *en este mismo número*]. El mosquito tigre asiático, otra especie invasora que también transmite el dengue, ocupa de inmediato los nichos que deja vacantes *A. aegypti*. Además, los tratamientos con las cepas de Caimán y de Tapachula, aunque tengan éxito, tal vez no resulten definitivos. La migración hacia Tapachula de mosquitos procedentes de regiones cercanas podría frustrar los intentos de erradicación y obligar a realizar frecuentes liberaciones de machos modificados para mantener la población bajo control.

James y sus colaboradores han estado ideando otra estrategia, aunque más controvertida, que se mantenga por sí sola. Se basa en «un sistema de transmisión de genes», que favorece la propagación de los genes de resistencia al dengue entre una población de mosquitos silvestres. Los genes en cuestión impiden la replicación de al menos una de las formas del virus del dengue, la que se conoce como tipo 2. A diferencia de los mosquitos de Tapachula, que mueren poco después de su liberación, los mosquitos dotados del sistema de transmisión de genes persistirán en el entorno. James afirma que aún faltan algunos años para poder llevar a cabo los ensayos con esta nueva técnica.

«Un método que propague genes entre las poblaciones va a presentar obstáculos reglamentarios mucho más difíciles», afirma James, quien se alegra, de momento, en centrarse en una estrategia autolimitante y no permanente, como la cepa de Tapachula.

El subsecretario de Salud Domínguez Zárate califica la estrategia de ingeniería genética como de bajo coste y de una elevada creatividad. «Si el dengue tuviera una importancia menor, ¿por qué habríamos de modificar algo natural?, se pregunta. «Debemos respetar la naturaleza todo lo que podamos». Aun así, los costes que ocasiona el dengue superan los producidos por los posibles riesgos ambientales, afirma. «La apuesta merece la pena.»

PARA SABER MÁS

Ingeniería genética contra las plagas de insectos. David A. O'Brochta y Peter W. Atkinson en *Investigación y Ciencia*, vol. 269, págs. 64-69, febrero de 1999.

Insect population control using a dominant, repressible, lethal genetic system. Dean D. Thomas et al. en *Science*, vol. 287, págs. 2474-2476, 2000.

Genetic elimination of dengue vector mosquitoes. Megan R. Wise de Valdez et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 108, n.º 12, págs. 4772-4775, 22 de marzo de 2011.

Estrategias genéticas para el control de la transmisión del dengue: **stopdengue.hs.uci.edu**

James L. Van Etten ocupa la cátedra William Allington de patología vegetal en la Universidad de Nebraska-Lincoln. Fue elegido miembro de la Academia Nacional de Ciencias de EE.UU. en 2003.



MICROBIOLOGÍA

Virus gigantes

El descubrimiento de virus de gran tamaño está cambiando el modo de entender la naturaleza de estos microorganismos y la historia de la vida

James L. Van Etten

La idea habitual que se tiene de los virus, en su mayoría cierta, es la de unos ladrones diminutos que se introducen a hurtadillas en la célula, se adueñan de su maquinaria biosintética y la obligan a fabricar una numerosa progenie que escapa de la célula y continúa con el ciclo replicativo. Se supone que los virus son minúsculos, incluso en comparación con las células de tan solo un micrómetro (1000 nanómetros) de diámetro, y que viajan con un equipaje ligero, en el que se incluyen unos pocos genes bien adaptados.

En 1992 se aisló un nuevo microorganismo de una torre de refrigeración de una planta energética en Bradford, donde Timothy Robotham, microbiólogo del Laboratorio de Salud Pública de Leeds, estaba buscando el agente causal de un brote local de neumonía. Su búsqueda le llevó a las templadas aguas de la torre de refrigeración, un conocido reservorio de bacterias patógenas del género *Legionella*, causantes de la neumonía legionelósica. Las partículas presentes en la muestra se identificaron erróneamente como bacterias. Esas entidades, aunque eran grampositivas y visibles al microscopio como patógenos dentro de la ameba *Acanthamoeba polyphaga*, sorprendentemente, no generaban la amplificación de ningún producto génico en la técnica de reacción en cadena de la polimerasa cuando se empleaban cebadores bacterianos universales.

Once años más tarde, en 2003, el misterioso organismo recibió una nueva identidad y nombre, *Acanthamoeba polyphaga* mimivirus, por tratarse de un virus que imitaba a los microbios. Representaba el mayor virus jamás descubierto. Los virus gigantes se conocían desde hacía algunos años. Muchos pertenecían al grupo de los virus nucleocitoplásmicos de ADN de gran tamaño (NCLDV). En él se incluyen varias familias, como *Poxviridae*, que infecta a vertebrados (como el virus de la viruela) e invertebrados; los virus acuáticos *Iridoviridae* y *Phycodnaviridae*, y los virus de vertebrados *Asfarviridae*. Se consideran virus gigantes aquellos cuyo genoma supera los 300 pares de kilobases y cuya cápside posee un diámetro igual o mayor que 200 nanómetros.

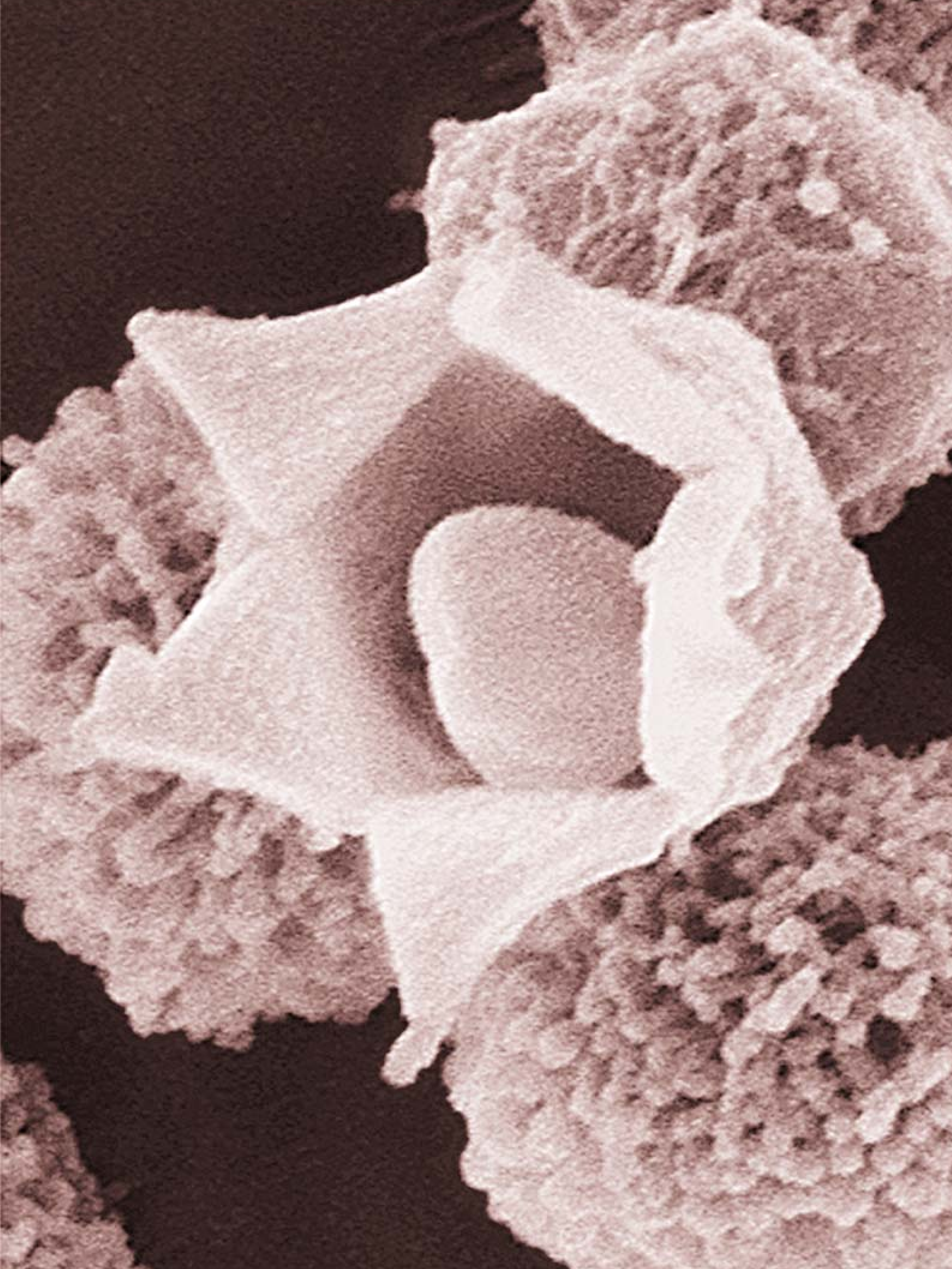
Los virus gigantes, como el mimivirus de la imagen, presentan características únicas, como la abertura en estrella (*stargate*), aquí visible después de la liberación de la carga genética del virus en el huésped.

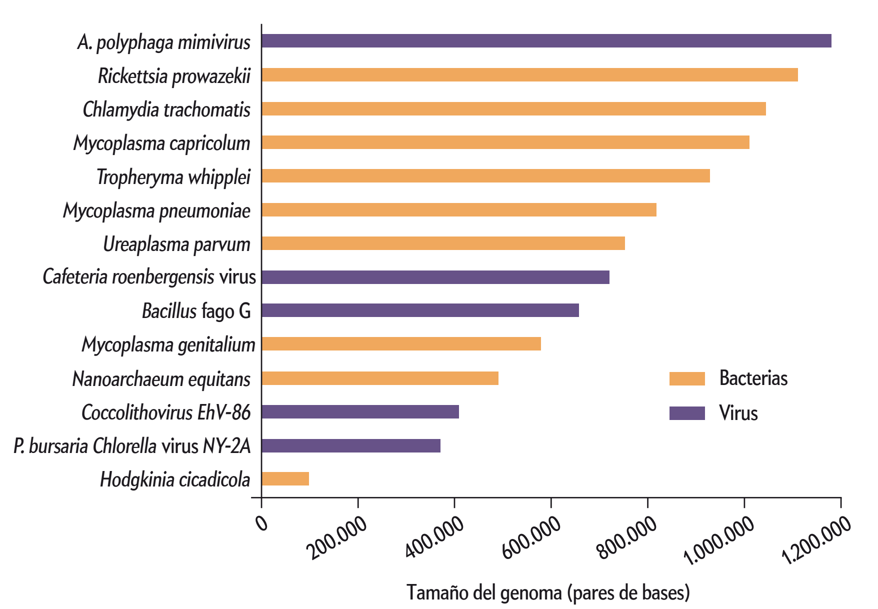
EN SÍNTESIS

Aunque a los virus se les supone un tamaño diminuto, en los últimos años se han descrito especies de grandes dimensiones que habían pasado inadvertidas debido a los métodos tradicionales empleados en la detección de virus.

Los virus gigantes poseen genomas que pueden ser mayores que los de algunas bacterias y presentan rasgos singulares: la mayoría de sus genes carecen de homología con otros genes celulares.

Con sus peculiares características, los virus gigantes están proporcionando lecciones sorprendentes de fisiología viral y ecología, a la vez que ponen en entredicho las arraigadas ideas sobre la forma del árbol filogenético de la vida.





El genoma de los virus gigantes puede ser mayor que los de algunas bacterias y posee características singulares. El 86 por ciento de las secuencias codificadoras predichas de proteínas del mimivirus (*arriba*) carecen de homología con otros genes incluidos en las bases de datos génicas.

Con un diámetro de 750 nanómetros, el mimivirus es un gigante entre los virus gigantes. Posee un genoma de 1,2 millones de pares de bases, una cantidad desmesurada para los estándares virales, y codifica la extraordinaria cifra de 1018 genes. A modo de comparación, la bacteria de vida libre más pequeña, *Mycoplasma genitalium*, presenta tan solo 450 nanómetros de diámetro y la mitad del tamaño del genoma del mimivirus, y codifica únicamente 482 proteínas. El organismo celular más pequeño descubierto, *Hodgkinia cicadicola*, un parásito de las cigarras descrito en 2009, cuenta con un genoma de solo 140.000 pares de bases y codifica la insignificante cantidad de 169 proteínas. *H. cicadicola* no puede vivir de forma autónoma y depende por completo del exuberante entorno de las células especializadas de las cigarras. Los virus no suelen considerarse organismos vivos, a pesar de que los mimivirus intervienen más en el proceso de replicación que *H. cicadicola* y muchas otras bacterias.

La mayoría de los virus gigantes se han identificado y caracterizado en los últimos años. Diversos motivos han demorado su detección. Uno de los más importantes corresponde al método básico empleado para aislar las partículas víricas: la filtración a través de filtros con poros de 200 nanómetros. Definidos los virus como partículas replicativas que aparecen en el filtrado de este tratamiento, los virus gigantes permanecieron sin detectarse durante tiempo (el mimivirus eludió esta táctica debido a su gran tamaño, que lo hacía visible al microscopio óptico). Los métodos habituales de plaqueado tampoco permitieron descubrirlos, ya que los virus sedimentaban en el blando agar del medio de plaqueado, con lo que impedían la difusión y la formación de placas visibles. Otra explicación del carácter esquivo de los virus más grandes es que la mayoría infectan a protistas, los cuales han recibido mucha menos atención que las plantas y los animales.

Con el interés puesto finalmente sobre ellos, los virus gigantes están proporcionando lecciones sorprendentes de fisiología vírica y ecología, sin mencionar el desafío que plantean a las arraigadas ideas sobre la forma del árbol filogenético de la vida.

UNA GRAN FAMILIA

Un aspecto central a la hora de ubicar los virus gigantes en el árbol de la vida constituye la presencia de numerosas familias génicas codificadas por virus anteriormente desconocidas. Una reconstrucción reciente de la evolución de los NCLDV apunta a la existencia de un antecesor común. Este podría contener un juego mínimo de 47 genes que habrían dejado vestigios en los genomas virales modernos. Al evolucionar, los NCLDV perdieron algunos genes, duplicaron otros y adquirieron genes de sus huéspedes y de otros organismos. De ahí que la reconstrucción de la historia evolutiva y de la filogenia viral suponga un rompecabezas. El análisis de 45 virus gigantes identificó 5 genes comunes a todos los virus NCLDV y otros 177 compartidos por al menos dos de las familias víricas. No obstante, la señal genética antigua resulta débil. Si se considera una selección de tres virus de la familia *Phycodnaviridae*, 14 genes en común indican una historia evolutiva compartida; sin embargo, dentro de los extensos genomas de estas tres entidades biológicas, existen más de 1000 genes en total.

El mimivirus es un buen representante de los virus gigantes: exhibe una variedad de propiedades únicas que apuntan a la diversidad de los virus gigantes conocidos y de otros que pronto se descubrirán. El virión del mimivirus (el conjunto del material genético y de la cubierta proteica) posee un núcleo icosaédrico, de unos 500 nanómetros, rodeado por una capa, de unos 140 nanómetros de grosor, constituida por fibras estrechamente empaquetadas. Todavía no se ha descrito la naturaleza exacta de las fibras, pero a tenor de la presencia de genes parecidos a los del colágeno en el genoma del mimivirus, estas podrían estar formadas por un tipo de colágeno sustituido, el componente fibroso del tejido conjuntivo de los animales. El mimivirus es el único miembro conocido de los NCLDV con esta capa de fibras periféricas. Otra característica particular del virión del mimivirus corresponde a la estructura en forma de estrella con cinco pliegues en un vértice del icosaedro, denominada «abertura en estrella» (*stargate*).

Los estudios indican que el mimivirus ingerido por una ameba penetra en

100 nanómetros

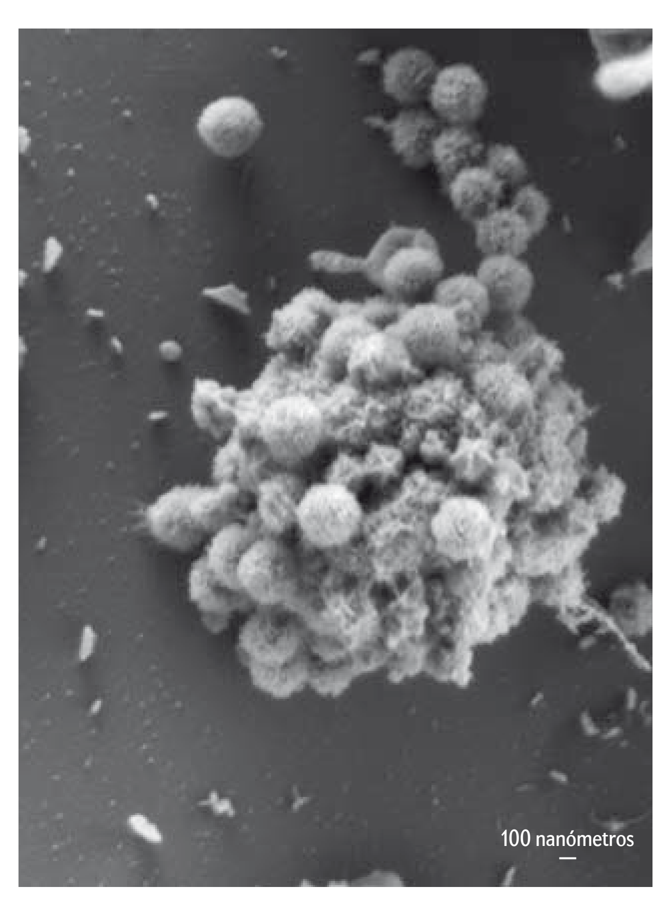
El mimivirus presenta una cubierta de fibras que recuerdan a la lana. En ella se aprecia una hendidura que carece de fibras, la abertura en estrella.

GRÁFICA CONFECCIONADA A PARTIR DE DATOS PROPORCIONADOS POR ALAN CANN, ENTRE OTROS; CORTESÍA DE ABRAHAM MINSKY, INSTITUTO WEIZMANN DE CIENCIAS (*mimivirus*)

la célula en un compartimento membranoso que se fusiona con los lisosomas, los orgánulos digestivos. Se cree que la actividad de las enzimas lisosomales da lugar a la abertura en estrella. A continuación, una membrana interna del mimivirus parece fusionarse con el compartimento membranoso y se crea un conducto a través del cual el genoma vírico pasa al citoplasma del huésped. Se forma entonces un complejo de ensamblaje de virus, la fábrica de replicación. Esta se va expandiendo hasta que, seis horas después de la infección inicial, ocupa una gran parte del volumen celular.

En la fábrica de replicación, el ADN se empaqueta en las cápsides vacías, parcialmente ensambladas, sin fibras. Curiosamente, se ha averiguado que el empaquetamiento del ADN tiene lugar a través de las caras de la cápside vírica que no forman parte de la abertura en estrella. Así pues, la entrada y la salida del ADN en el virión parece producirse a través de diferentes vías, algo excepcional en los virus.

En 2008, se aisló una nueva cepa de mimivirus en otra torre de refrigeración, esta vez en París. Con un genoma ligeramente mayor que el del mimivirus, la cepa se denominó mamavirus, y trajo con ella una sorpresa: un virus parásito llamado Sputnik. Los satélites virales, bastante habituales, son agentes subvirales constituidos por pequeñas cantidades de ácidos nucleicos cuya replicación depende del genoma vírico. En el caso que nos ocupa, el compañero viral pudo haberse bautizado de forma incorrecta, puesto que Sputnik parece no ser un simple satélite sino un parásito legítimo de su huésped. Cuando se halla presente, interfiere con la infectividad del mamavirus sobre las amebas; parece ocasionar la formación de viriones de mamavirus defectuosos, algo infrecuente en los virus satélites tradicionales. Esta propiedad sin precedentes y otras características sobre su estilo de vida han llevado a proponer un nuevo grupo y un nuevo nombre, «virófago», para virus que parasitan virus gigantes. Un artículo publicado en abril de 2011 da cuenta de una nueva cepa de mimivirus infectada por una nueva cepa de virófago. En la concurrida empresa de la investigación de los virus gigantes, las noticias aparecen sin cesar.



Al igual que muchos virus, los mimivirus generan descendencia en un complejo denominado fábrica de replicación. Se observan en esta micrografía electrónica las partículas víricas con y sin cubierta de una fábrica de virus aislada de una ameba, ocho horas después de la infección.

ORÍGENES

El origen del grupo NCLDV resulta controvertido. Desde el descubrimiento de los mimivirus, dado que estos poseen una gran cantidad de genes distintos de cualquier otro gen celular (el 86 por ciento del total de su secuencia codificante) algunos investigadores han concluido que los NCLDV deberían considerarse un cuarto dominio de la vida junto a Archaea, Bacteria y Eukarya. Se ha propuesto que algunos genes de los NCLDV pueden haber surgido a partir del mismo acervo génico del que se originaron los procariotas y eucariotas.

Un par de hipótesis opuestas interesantes sugieren que, dado el tamaño y la complejidad de los genomas de los NCLDV, o bien el antecesor de los modernos NCLDV pudo dar lugar al genoma eucariota, o el deterioro de un genoma eucariota pudo producir el genoma de la familia de los NCLDV. La transferencia génica horizontal entre virus y huésped también ha desempeñado una función importante en la evolución de los NCLDV (y de sus células huésped) desde muy atrás en la historia biológica.

Teniendo en cuenta su peculiar morfología, ecología, tamaño del genoma y singularidad génica, se ha planteado una nueva denominación para los virus gigantes: «girus». El objetivo científico y semántico del nuevo nombre es hacer hincapié en las propiedades singulares de los virus de ADN de gran tamaño, que probablemente presentan una historia evolutiva única y compartida. El término «virus» («veneno» en griego) tiene más de cien años. Desde ese tiempo se han descubierto una enorme diversidad de agentes víricos, con una gran divergencia en sus estilos de vida, fisiologías y estrategias de replicación. Ese nombre genérico funcionó de modo satisfactorio para referirse a los agentes genéticos simples y de tamaño reducido que dependían de sus huéspedes para multiplicarse. El término parece menos aceptable a medida que se caracteriza con mayor detalle la familia de los virus de ADN de gran tamaño, y al descubrirse las relaciones evolutivas entre los miembros sobre la base de un profundo análisis bioinformático de sus largos y complejos genomas. En los pasados dos años, el término «girus» ha ido apareciendo con mayor frecuencia en la bibliografía virológica.

FUNCIÓN ECOLÓGICA

Parte de la caracterización de los nuevos organismos se basa en su papel modelador del entorno. El hecho de haber pasado inadvertidos no significa que los virus gigantes resultaran infrecuentes o apenas influyeran en sus esferas ecológicas. En los últimos años, el campo emergente de la metagenómica ha abierto una nueva ventana en la comprensión de los ecosistemas. El metagenoma de un ambiente es la suma de todos los genomas de los organismos presentes. Se estudia mediante biobalística, una técnica en la que se recoge una muestra del entorno, se corta al

El origen evolutivo de los virus

¿Dónde se sitúan los virus en el árbol filogenético de la vida?

En un artículo de 2006 publicado en la revista *Genome Biology*, Jean-Michel Claverie, del Laboratorio de Información Estructural y Genómica de Marsella, hizo una provocativa contribución al antiguo debate sobre si los virus son seres vivos o no. Según él, cuando se hace referencia a un virus, debería considerarse la fábrica de virus como el organismo vírico real. En esta interpretación, la naturaleza viva de los virus resulta indiscutible, en las mismas condiciones que los parásitos intracelulares bacterianos. La partícula del virión representaría solo una forma de reproducción, una etapa en la vida de un virus antes de que se enfunde en el aparato metabólico de una célula huésped, dirija la construcción de la fábrica interna del virus y tome la tarea de reproducirse como cualquier otra forma de vida unicelular.

En 2009, David Moreira y Purificación López García, de la Unidad de Ecología Sistemática y Evolución de la Universidad París-Sur, recordaron este argumento en una publicación en *Nature Reviews Microbiology*. Bajo el título «Ten reasons to exclude viruses from the tree of life» (Diez razones para excluir a los virus del árbol de la vida), los autores expusieron que estas entidades genéticas no solo no están vivas, sino que tampoco tenían cabida en el árbol filogenético de la vida. Uno de los factores que estimularon la escritura de su artículo fue el descubrimiento de un mimivirus gigante en 2003, así como la idea, propuesta por algunos analistas del genoma de los mimivirus, de que los virus gigantes representarían una cuarta rama del árbol de la vida junto a los otros tres dominios, Archaea, Bacteria y Eukarya. Moreira y López García rechazaban con rotundidad este planteamiento. Sus diez razones para excluir los virus del árbol de la vida sonaron tan contundentes como sutiles. Los virus no están vivos. Sus genomas son robados. No hay ni un solo gen compartido por todos los virus (no hay una línea vírica ancestral). Y aún más, los virus son polifiléticos. Un árbol filogenético constituye una representación conceptual de las relaciones evolutivas, las cuales solo se pueden inferir mediante el estudio de las características hereditarias de una línea ininterrumpida, retrocediendo hasta un ancestro común de los taxones. Los virus, en cambio, aparecen aquí y allá en el árbol evolutivo y recogen de sus huéspedes la carga genética mediante transferencia horizontal.

En un número posterior de la revista, se dedicaron diez páginas a una vehemente correspondencia sobre el tema planteado por Moreira y López García. Resulta imposible presentar aquí todos los argumentos, pero un resumen puede reflejar el interés del debate y mostrar de qué manera los nuevos descubrimientos sobre los virus gigantes aportan nuevos puntos de vista a la discusión.

Jesús Navas Castillo, de la Estación Experimental La Mayora del CSIC, en Málaga, abrió la polémica con un llamamiento a la lucidez. Según él, vincular definiciones filosóficas vagas de la vida con la inclusión de un ser en el árbol de la vida resultaba discutible. Desestimando de pleno algunos de los argumentos originales, asumió a continuación una premisa fáctica. A la afirmación de que las elevadas tasas de transferencia génica horizontal y recombinación en los virus significan que los genes reunidos en un genoma tienen pocas posibilidades de permanecer juntos después de pocas generaciones, Navas Castillo respondió con firmeza: «La genómica comparativa no respalda esa volatilidad. Los genes de los virus que han sido bien definidos se mantienen juntos durante miles de millones de años, tal y como se ha demostrado en los virus gigantes y los virus de ARN del tipo picornavirus».

En la siguiente entrega, entre otros puntos, Jean-Michel Claverie y Hiroyuki Ogata abordaron la cuestión del rechazo de los virus como seres vivos debido a su origen polifilético. Señalaron que en un principio la idea se había planteado no por la naturaleza de los virus en general, la gran mayoría de ellos polifiléticos, sino por las características de los virus gigantes recién descubiertos. De hecho, ellos habían propuesto el término «girus» porque las propiedades, y tal vez los orígenes evolutivos, de los virus de ADN de gran tamaño eran tan distintos que no parecía razonable agruparlos con los demás virus. «Es legítimo plantearse que los girus ancestrales quizá no habrían compartido las raíces profundas y reticuladas del "bosque de la vida".» A continuación, observaron que denigrar los virus como ladrones de genes del huésped no resultaba pertinente, ya que el 86 por ciento de los genes de los mimivirus constituye «materia oscura genómica» sin semejanza alguna con los genes celulares conocidos. Además, presentaron un árbol filogenético de una proteína implicada en la replicación del ADN en el que los mimivirus y otros virus gigantes, como *Ectyocarpus siliculosus* virus-1 (ESV-1), se habrían ramificado cerca de donde la vida se separó en los tres dominios.

En una respuesta a ese árbol filogenético, Moreira y López García se defendieron con un árbol más rico, con más especies (106 taxones en lugar de 20), y presentaron una amplia selección de genes homólogos de huéspedes de mimivirus y de ESV-1, que supondrían fuentes de transferencia horizontal de genes. También demostraron la posición filogenética no solo de una, sino de tres copias del mismo gen implicado en la replicación del ADN encontrado en los virus. Llegaron a la conclusión de que el grupo génico no era meramente polifilético, sino que tenía raíces en eucariotas de parentesco lejano antes de que los genes fuesen robados por los virus.

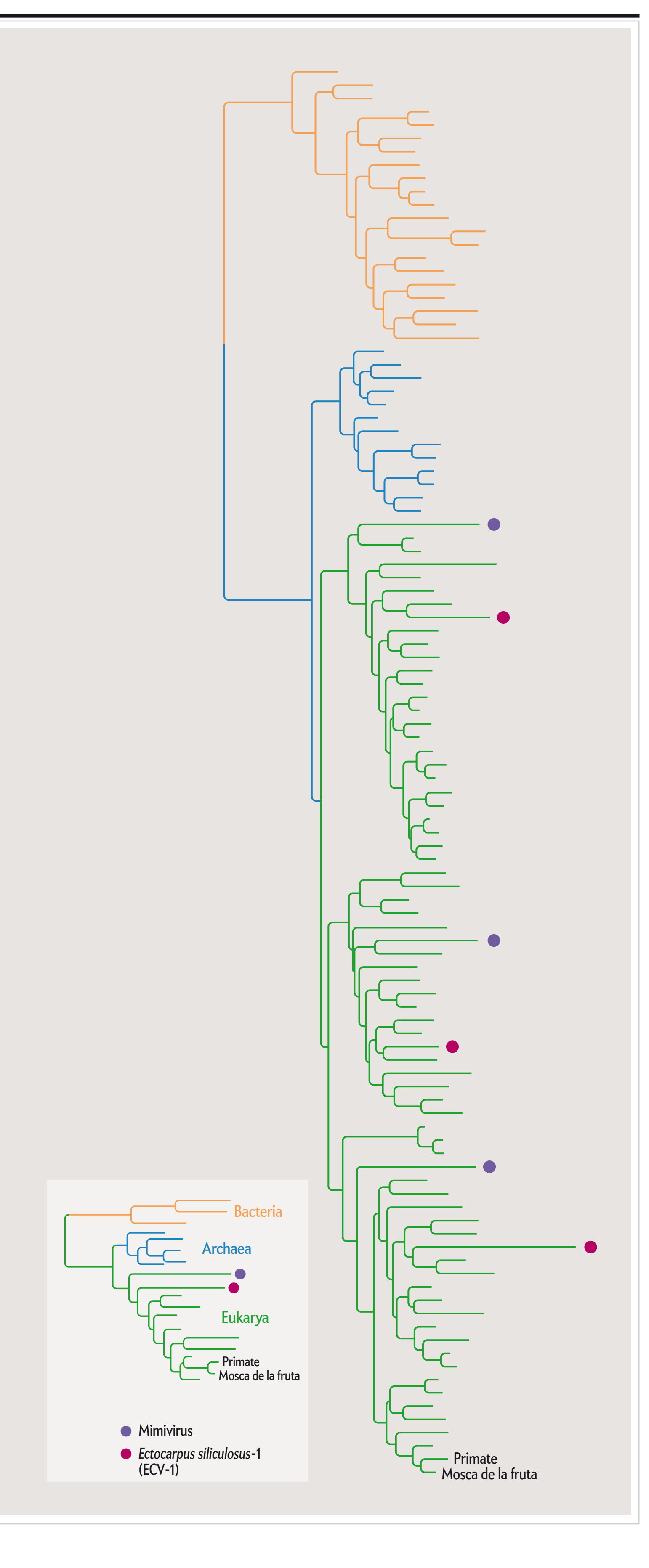
Didier Raoult, de la Unidad de Investigación de Enfermedades Infecciosas y Tropicales Emergentes, en Marsella, se opuso de modo determinante y planteó que la idea del árbol de la vida resultaba errónea. Los organismos actuales son quiméricos, «formados por un mosaico de secuencias de orígenes diferentes que hacen del árbol de la vida una teoría obsoleta». El árbol con raíces imaginado por Darwin solo tiene sentido en la era genómica si se construye gen a gen, para ser utilizado con el objeto de deducir la historia evolutiva de un gen, no de las formas de vida en su conjunto.

¿La última palabra de este debate? Aún debe escribirse.

La redacción de American Scientist

Un árbol filogenético de 20 taxones ilustra el lugar de un gen implicado en la replicación del ADN en el mimivirus y en el virus gigante ECV-1 (*izquierda*). Sus ramas surgieron en un tiempo evolutivo remoto, durante la época en que Eukarya y Archaea se separaron en dominios diferentes. Un árbol más complejo, de 106 taxones (*derecha*), ampliado con genes homólogos de proteínas implicadas en la replicación del ADN, cuenta una historia un tanto diferente. En él se observa que esos genes homólogos presentan una relación más estrecha con los genes homólogos de organismos procedentes de ramificaciones mucho más tardías, situadas en troncos muy separados en el árbol filogenético.

DATOS ADAPTADOS DE LA CARTA DE CLAVERIE Y OGATA Y DE LA RESPUESTA DE LÓPEZ GARCÍA Y MOREIRA, INCLUIDAS EN *NATURE REVIEWS MICROBIOLOGY*, VOL. 7, 615-625, 2009.



azar el ADN de la misma y se secuencian los fragmentos resultantes. A continuación, las secuencias solapantes se alinean para reconstruir los genes. Algunos de ellos pueden identificarse en referencia a bases de datos génicas, aunque la mayoría de ellos no. El gran número de genes no identificados en los estudios de metagenómica da impulso al movimiento emergente de biodiversidad. Gracias a la metagenómica, nos vemos capacitados para afirmar que el número de especies que desconocemos es inmenso.

En una demostración asombrosa del poder de la secuenciación ambiental, Mya Breitbart, Forest Rohwer y otros demostraron en 2002 que 200 litros de agua marina contenían más de 5000 virus diferentes, casi todos ellos de especies desconocidas. En otro estudio, la Expedición de Muestreo Mundial del Océano tomó muestras de las aguas desde Nueva Escocia hasta el Pacífico oriental durante una circunnavegación que duró dos años. Mediante un enfoque más dirigido, se emplearon secuencias conocidas de productos proteicos, tales como fragmentos específicos de la ADN polimerasa, para determinar el ADN metagenómico y averiguar así la frecuencia de las especies. En el 86 por ciento de los sitios de muestreo, los parientes de los mimivirus eran los más abundantes después de los bacteriófagos. Quedaba claro que los girus proliferaban en la naturaleza y muchos de ellos aún estaban por descubrir.

También se hace cada vez más evidente su influencia en la configuración del entorno. Más de la mitad de la fotosíntesis de la Tierra la llevan a cabo microorganismos, entre ellos cianobacterias y microalgas, a los que se denomina en conjunto fitoplancton. Se estima que en cualquier momento, el 20 por ciento de todas las células del fitoplancton están infectadas por virus. Entre ellos figuran los virus gigantes, en un número desconocido pero sin duda importante. El microzooplancton, que se alimenta del fitoplancton, resulta fundamental en la ecología de los sistemas marinos y esencial para el bienestar de la Tierra. Hasta la fecha solo se ha descubierto un virus que infecte a un organismo del microzooplancton, en concreto, *Cafeteria roenbergensis*, o CroV, un virus gigante (730 pares de kilobases, 544 genes codificadores de proteínas predichos). Curiosamente, CroV presenta también un virófago asociado a él.

El fitoplancton se halla estrechamente ligado a otro virus gigante, con consecuencias importantes para la tierra, el mar y el aire, así como para la ecología del fitoplancton. *Emiliani huxleyi*, una de las algas unicelulares fotosintéticas más abundantes en los océanos, produce pequeñas escamas de carbonato cálcico. Estas microalgas desempeñan una función esencial en el ciclo del carbono de los océanos. De manera periódica ocasiona enormes floraciones de hasta 100.000 kilómetros cuadrados en ambos hemisferios. Un virus gigante que infecta a *E. huxleyi*, llamado EhV (407 pares de kilobases, 472 secuencias codificantes predichas), contribuye a poner fin a esas floraciones. Ello conlleva la liberación de grandes cantidades de materia orgánica y escamas de carbonato de *E. huxleyi*, que forman enormes depósitos, como los que dieron origen a los acantilados Blancos de Dover.

La finalización de las floraciones de *E. huxleyi* también da lugar a la liberación de una sustancia que es alterada por otros microorganismos. Se producen así enormes cantidades de dimetilsulfuro, responsable del olor que asociamos con el agua del mar. Cuando el dimetilsulfuro llega a la atmósfera, induce la formación de nubes y lluvia. Por lo tanto, la infección por EhV desempeña una función fundamental en la ecología, geología y clima del lugar.



Los virus, incluidos los gigantes, desempeñan importantes funciones en los ecosistemas en los que se desarrollan. La finalización de las floraciones de fitoplancton (*Emiliani huxleyi*) debida a la infección por el virus gigante EHV da lugar a la deposición de los esqueletos de carbonato cálcico del fitoplancton, lo que conduce a formaciones como los acantilados Blancos de Dover.

¿VIRUS GIGANTES EN HUMANOS?

Los mimivirus de las muestras de la torre de refrigeración de Bradford se hallaron entre otras bacterias que provocan neumonía. Ello ha planteado la cuestión de si los mimivirus ocasionarían enfermedades a los humanos.

A primera vista, parece poco probable que un patógeno de las amebas dé el salto e infecte a las personas, ya que estamos separados de las amebas por 800 millones de años de evolución. Por lo general, las infecciones víricas son muy específicas de sus huéspedes, hecho que se deriva de la necesidad que tiene el virus de aprovechar la maquinaria biosintética de la célula huésped para poder replicarse. Ello exige numerosas interacciones macromoleculares, complejas y específicas, entre los componentes del virus y del huésped en cada etapa de la infección, con el secuestro de gran parte de la maquinaria celular, a menudo unido a la inhibición de las defensas de la célula. No es extraño, pues, que algunos virus bastante parecidos entre sí, como el VIH, que produce el sida, y la cepa simia, el SIH, no ocasionen infecciones cruzadas en primates estrechamente emparentados.

Sin embargo, el mimivirus desafía a menudo las normas habituales. Se introduce en células fagocíticas (como en las amebas y tal vez en macrófagos humanos) cuando estas lo engullen. Después de la digestión, sale de la vacuola que lo rodea a través de una fusión no específica de las membranas. A partir de ese momento, su enorme complemento de más de 1000 genes le confiere la capacidad de secuestrar o reproducir las funciones celulares, más allá de las posibilidades de un virus, con una menor dotación genética.

Hasta la fecha, solo hay unos pocos indicios de que los mimivirus puedan infectar a los humanos. Algunos estudios realizados en un laboratorio canadiense hacen pensar que el enigma sigue abierto. Otros trabajos no han hallado ninguna prueba al respecto. Una revisión de 2009 propuso que lo más prudente es considerar de momento a los mimivirus como un patógeno con bioseguridad de clase 2, designación para aquellos que ocasionan enfermedades leves o que difícilmente se transmiten por aerosol en un laboratorio.

Los virus gigantes NCLDV poseen una historia evolutiva antigua, pero para los virólogos representan un descubrimiento reciente. Cabe señalar que, además de los NCLDV, hay otros virus clasificados como girus, entre ellos virus bacterianos, como el fago G y el virus del síndrome de la mancha blanca, que ocasiona una enfermedad de gran importancia económica en el cultivo de la gamba. Con las investigaciones aún en las primeras etapas, los virus gigantes ya están produciendo beneficios científicos y económicos. Se están descubriendo nuevas enzimas con valor comercial gracias a sus funciones y a su reducido tamaño, lo que las convierte en modelos ideales para estudios mecanísticos y estructurales. En la actualidad, un obstáculo para el estudio de los girus representa la imposibilidad de modificarlos genéticamente mediante técnicas moleculares. Esperemos que esta barrera caiga pronto.

PARA SABER MÁS

Structural studies of the giant Mimivirus. Chuan Xiao en *PloS Biology*, vol. 7, n.º 4, pág. e100092, 2009.

Conflict in revisiting the virus concept. Patrick Forterre en *Intervirology*, vol. 53, págs. 362-378, 2010.

New dimensions of the virus world discovered through metagenomics. David M. Kristenson, Arcady R. Mushegian, Valerian V. Dolja y Eugene V. Koonin en *Trends in Microbiology*, vol. 18, págs. 11-19, 2010.

Amoebae as genitors and reservoirs of giant viruses. Didier Raoult y Mickael Boyer en *Intervirology*, vol. 53, págs. 321-329, 2010.

Another really, really big virus. James L. Van Etten en *Viruses*, vol. 3, págs. 32-46, 2011.

Hugo Duminil-Copin realiza su doctorado en teoría de la probabilidad y sistemas dinámicos en la Universidad de Ginebra bajo la dirección de Stanislav Smirnov, autor de algunos de los resultados de mayor relevancia expuestos en este artículo.

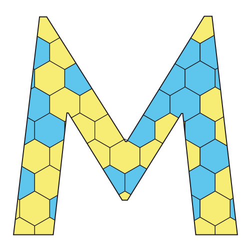


MATEMÁTICAS

La percolación, un juego de mosaicos aleatorios

Los modelos de percolación en dos dimensiones guardan una estrecha relación con la simetría conforme, un campo de enorme interés en teoría cuántica de campos y física estadística

Hugo Duminil-Copin



axime se encuentra pensativo. Su familia acaba de encargarle una misión de suma importancia: alicatar el suelo de la cocina con baldosas hexagonales. Por si fuera poco, sus hijos se pelean sobre el color de los azulejos. A uno le gustaría que fuesen amarillos; al otro, azules. Para evitar conflictos, Maxime decidirá los colores al azar: cada vez que coloque una baldosa, lo sorteará a cara o cruz.

Maxime lanza una moneda al aire. ¡Cara! El primer azulejo será amarillo. Después, obtiene una cruz. La baldosa contigua será azul. Maxime se pregunta ahora por el resultado. No tanto por la estética de su futura cocina, sino más bien sobre sus aspectos lúdicos. ¿Será posible atravesar la sala pisando solo baldosas azules adyacentes? Y, si camina sobre la línea que separa hexágonos azules y amarillos, ¿cuantos pasos necesitará para llegar desde la puerta hasta el muro opuesto? Aunque parezcan simples acertijos, las preguntas de Maxime han cautivado la atención de matemáticos y físicos durante más de un siglo.

El problema de la coloración aleatoria de un retículo —en este caso, el formado por los hexágonos— constituye un modelo de percolación en dos dimensiones. El origen etimológico de la palabra (del latín *percolare*, «colarse a través») hace referencia al paso de un líquido a través de un material poroso, como ocurre con el agua cuando atraviesa las partículas de café molido. Uno de los primeros estudios detallados del fenómeno data de 1957, cuando el ingeniero Simon Broadbent y el matemático

EN SÍNTESIS

En su origen, la percolación versaba sobre los procesos de filtración de un fluido a través de un sólido permeable.

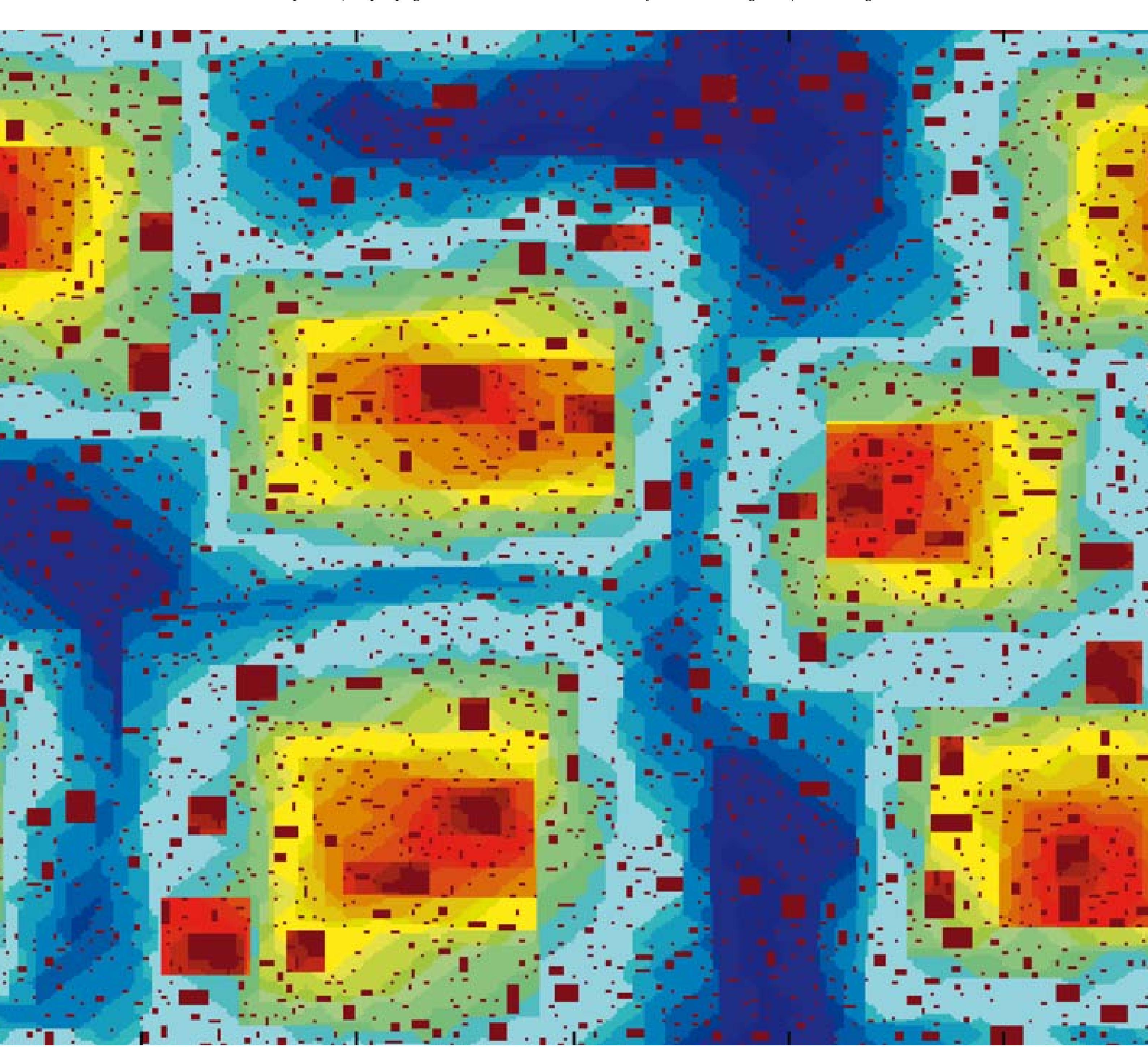
Para analizar dicho fenómeno, se han concebido modelos aleatorios simplificados y fáciles de analizar en ciertos límites.

El estudio de los modelos de percolación ha resultado muy rico y variado, con numerosas aplicaciones en distintas disciplinas.

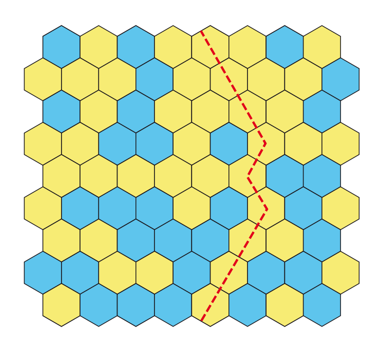
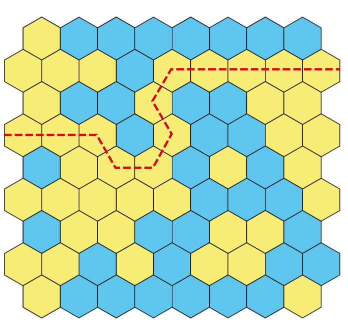
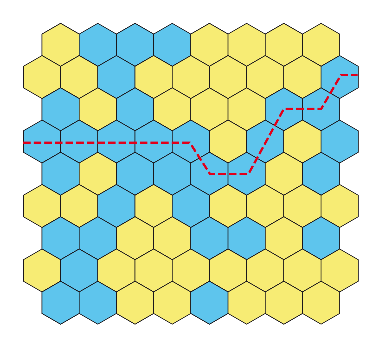
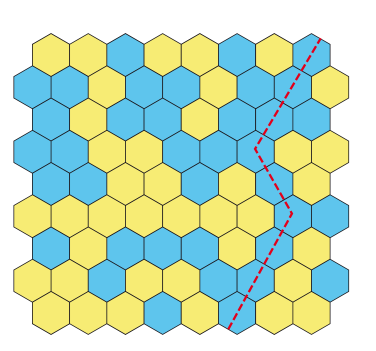
Los modelos de percolación se relacionan con las teorías de campos conformes en dos dimensiones y con las transiciones de fase.

John Hammersley presentaron un modelo de percolación para estudiar la manera en que la carbonilla obstruía las máscaras de gas. Desde entonces, el problema ha atraído la atención de expertos en las más diversas áreas, ya que aparece de una forma u otra en todo tipo de situaciones: la filtración de un fluido a través de un material poroso, la propagación de incendios o de epidemias, o la conductividad en un medio mixto formado por un conductor y un aislante, entre otros.

Consideremos el ejemplo de los incendios de copa, aquellos en los que la propagación del fuego se produce cuando las ramas de dos árboles se tocan. Si modelizamos el bosque como un conjunto de hexágonos, donde algunos de ellos se encuen-



Una de las aplicaciones de la teoría de la percolación consiste en el estudio de la propagación de incendios forestales. En el modelo ilustrado aquí, denominado de percolación «autosostenida» (*bootstrap*), cada celda elemental representa un árbol. A partir de una configuración inicial arbitraria en la que ciertos árboles se encuentran en llamas, el incendio evoluciona de acuerdo con unas reglas muy sencillas: un árbol que en el instante t no arde se incendiará en el instante $t + 1$ si, al menos, dos árboles vecinos se encuentran en llamas (en la figura, los árboles que han ardido primero se han coloreado de rojo; los que se han incendiado más tarde, de azul). Dada una modelización del bosque, podemos preguntarnos por la probabilidad de que un incendio acabe con todos los árboles.

Cuatro alicatados posibles para una habitación en la que el color de las baldosas se elige de forma aleatoria a cara o cruz. La existencia de un camino azul (o amarillo) que cruza la sala de izquierda a derecha —un camino de percolación— impide la existencia de una senda amarilla (o azul) que la atraviese de arriba abajo. Una de las cuestiones que los teóricos de la percolación buscan responder es la probabilidad de que exista un camino de percolación en un retículo de tamaño infinito.

tran ocupados por un árbol y otros no, el estudio de la propagación de incendios se convierte en un análisis sobre los conjuntos posibles de árboles adyacentes. Con todo, la simplificación anterior permite explorar numerosas propiedades intrínsecas al proceso e independientes de los detalles de cada fenómeno particular. Hace algunos años, Bernard Sapoval, de la Escuela Politécnica de Francia, recurrió a esta clase de modelos para estudiar la corrosión en metales. En 2008, la teoría de la percolación permitió entender la evolución de las epidemias de peste que azotaban a los grandes roedores en Kazajistán.

Aquí nos centraremos en el modelo de percolación geométrica sobre el alicatado de una superficie recubierta con baldosas hexagonales. Veremos cuán sorprendentes pueden resultar las respuestas a las preguntas que se planteaba Maxime y, también, por qué estas hacen de la percolación un área de investigación tan fértil.

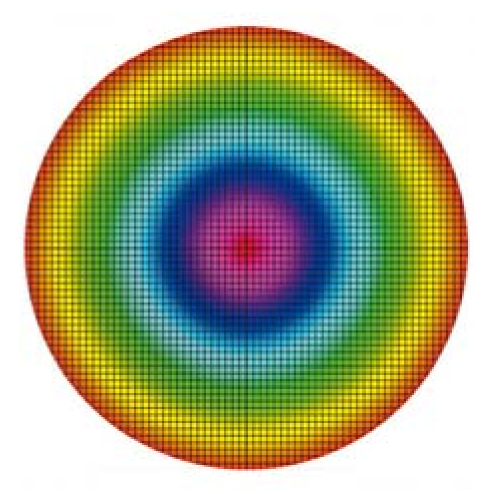
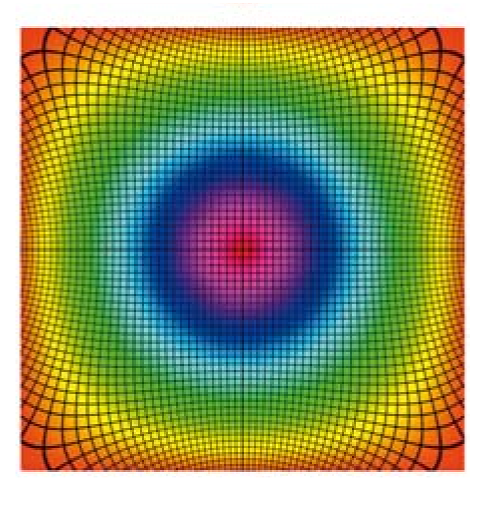
DE UN LADO A OTRO

Volvamos, pues, a la primera pregunta de Maxime. Una vez alicatado el suelo, ¿será posible atravesar la habitación caminando solo sobre hexágonos azules contiguos? Dado que la elección de colores es aleatoria y que Maxime todavía no ha concluido su labor, desconocemos si la cocina podrá cruzarse o no. Sin embargo, siempre podemos calcular la probabilidad de que así sea.

Imaginemos que se trata de una habitación cuadrada. En tal caso, evaluar la probabilidad de que exista un camino que lleve de un muro a otro resulta muy sencillo. La clave reside en percatarse de la existencia de dos posibilidades mutuamente excluyentes: tras finalizar la tarea, o bien aparecerá un camino de baldosas azules adyacentes que permita atravesar la cocina de derecha a izquierda, o bien uno de azulejos amarillos que la cruce de arriba abajo. Además, la probabilidad de que ocurra una cosa u otra ha de ser la misma, ya que, por un lado, la habitación es cuadrada y, por otro, el problema permanece invariable si intercambiamos los colores azul y amarillo (pues ambos se dan con igual probabilidad). Por tanto, aparecerá un camino azul que atraviese la cocina de lado a lado en la mitad de los casos (una probabilidad igual a 1/2).

En este caso, la solución al problema de Maxime resulta muy sencilla gracias a la geometría cuadrangular de la cocina y a que ambos colores son equiprobables. De aquí en adelante —y salvo cuando declaremos lo contrario— daremos por sentado que tanto el azul como el amarillo aparecen con la misma probabilidad. Como veremos después, este caso se corresponde con una percolación crítica, la situación más interesante y para la que existen métodos de análisis más avanzados.

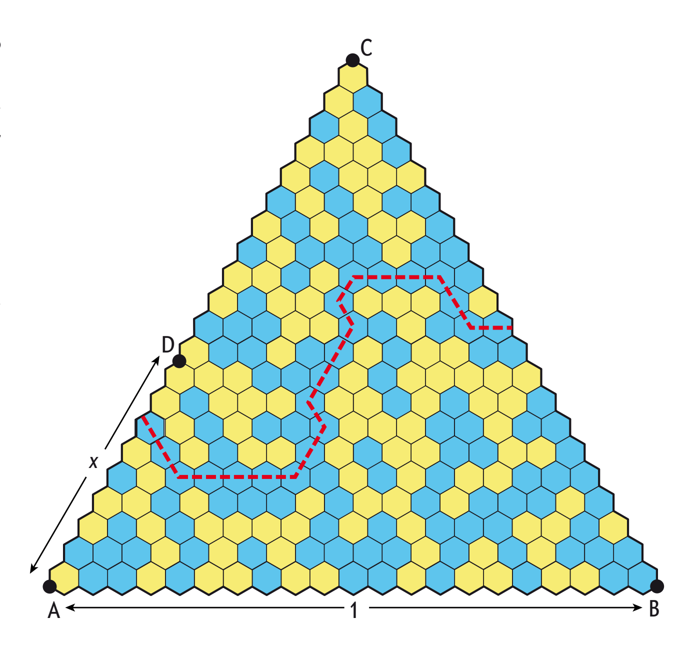
Pero ¿que sucedería en una habitación rectangular? Aunque en un contexto diferente, el mecánico y matemático De Volson Wood se planteaba esta cuestión en 1894 en un número de *The American Mathematical Monthly*. A propósito del artículo, el editor de la revista respondió: «Se trata de un problema de gran interés. Si alguien nos remitiese la solución completa, la publicaríamos en el próximo número».

Una aplicación conforme consiste en una transformación del plano que, en cada punto, deja invariantes los ángulos. Aunque los ejemplos más comunes son las traslaciones, las rotaciones y las homotecias (dilataciones), existen infinitas transformaciones conformes sobre el plano: cualquier función inyectiva y analítica de una variable compleja define una aplicación conforme. Aquí se muestra un ejemplo que convierte un círculo en un cuadrado. Las líneas negras sirven de referencia para comprobar que los ángulos se preservan. En más de dos dimensiones, el grupo de transformaciones conformes es mucho menos rico.

TODAS LAS ILUSTRACIONES SON DEL AUTOR, SALVO OTRA INDICACIÓN
SÉBASTIEN PÉREZ-DUARTE (*transformación conforme*)

Un camino de percolación azul cruza este triángulo equilátero desde el borde *DA* hasta el lado *BC*. Si cada lado es de longitud unidad, la probabilidad de que exista un camino de percolación en el límite en el que el tamaño de las baldosas hexagonales tiende a cero es igual a x, donde x denota la longitud del segmento *DA*.



Sin duda, pecó de optimista: habría de pasar más de un siglo antes de que alguien lograse hallar una solución.

En primer lugar, resulta fácil ver que el argumento anterior pierde su validez en el caso rectangular, puesto que la probabilidad de que exista un camino de azulejos azules que atraviese la sala de izquierda a derecha ya no coincide con la probabilidad de que haya uno de baldosas amarillas que la cruce de arriba abajo. De hecho, en el caso rectangular no disponemos de ninguna expresión exacta para calcular la probabilidad. No obstante, podemos considerar un límite relacionado y con enorme interés teórico.

HEXÁGONOS INFINITESIMALES

Hasta ahora, no hemos especificado el tamaño de los hexágonos ni el de a habitación. Nada cambia si Maxime alicata su cocina de 3 metros por 3 metros con hexágonos de 10 centímetros de lado, o si lo hace con hexágonos de 3 centímetros: el razonamiento anterior conserva su validez en todos los casos. Sin embargo, si las dimensiones de la sala ascienden a 3 metros de largo por 4 de ancho, la probabilidad de poder cruzarla sí dependerá del tamaño de las baldosas.

Llevemos al extremo el ejemplo anterior e imaginemos un alicatado con hexágonos de un micrómetro de lado; después, otro con azulejos de un nanómetro, etcétera. Al considerar baldosas cada vez menores, la probabilidad que deseamos calcular se aproximará a un valor límite bien definido. La percolación constituye un modelo adecuado solo para sistemas que contengan un gran número de hexágonos, por lo que un procedimiento natural consiste en tomar el límite en el que el tamaño de los hexágonos tiende a cero. ¿Qué sucede entonces en el caso de una habitación rectangular?

Para responder a esta pregunta, debemos primero aclarar algunos conceptos. Primero, definamos el *límite de escala* como aquel en el que tamaño de los hexágonos tiende a cero. Numerosos modelos de física estadística (la disciplina que estudia los sistemas compuestos por un gran número de partículas) admiten también un límite de escala.

LAS VIRTUDES DE LA INVARIANCIA CONFORME

Transiciones de fase y percolación

Numerosos sistemas físicos sufren transiciones de fase: cambios bruscos en sus propiedades cuando algún parámetro alcanza un valor crítico. A presión ambiente, por ejemplo, el hielo se convierte en agua líquida cuando la temperatura sobrepasa los 0 grados Celsius. También el modelo de percolación considerado aquí exhibe una transición de fase: cuando la probabilidad de colocar una baldosa azul supera el valor crítico $p_c = 1/2$, aparece un camino de baldosas azules infinito que atraviesa el espacio de lado a lado.

Durante una transición de fase, el comportamiento de un sistema físico queda especificado por el valor de ciertas propiedades macroscópicas, denominadas parámetros termodinámicos. En el caso de la percolación, podemos estudiar la densidad $D(p)$ de los grupos de baldosas azules contiguas que se extienden de un lado a otro del retículo (la proporción de hexágonos que cumplen dichas propiedades con respecto al total). Puede demostrarse que $D(p) = 0$ cuando $p < 1/2$, y que $D(p)$ es estrictamente positiva cuando $p > 1/2$. En este caso, estudiar la transición de fase supone analizar el comportamiento de $D(p)$ cuando p se aproxima a 1/2 «desde arriba» (para valores ligeramente superiores a 1/2). La simetría conforme del sistema permite demostrar que $D(p)$ tiende a 0 de acuerdo con la ley de potencias $(p - 1/2)^{5/36}$.

Las investigaciones de Stanislav Smirnov permitieron predecir el comportamiento de otras cantidades termodinámicas del modelo, como la longitud de correlación. Esta proporciona una estimación de la distancia máxima que puede mediar entre dos puntos para que lo ocurrido en uno ejerza alguna influencia sobre el otro. Cuando un sistema se encuentra en su punto crítico (durante una transición de fase), la longitud de correlación tiende a infinito de acuerdo con una ley que resulta posible determinar.

Otro sistema de física estadística que presenta una transición de fase es el modelo de Ising en dos dimensiones. Este consta de un retículo rectangular plano, en el que las celdas se encuentran ocupadas por átomos cuyo espín (o momento magnético) puede adoptar uno de dos valores: +1 o −1. Cada espín crea un pequeño campo magnético, el cual ejerce un efecto sobre sus primeros vecinos (los átomos contiguos), por lo que todos los espines tienden a alinearse. Esta propensión se ve contrarrestada por las fluctuaciones térmicas del sistema. Si bien simple, el modelo de Ising describe muy bien algunas propiedades de los materiales ferromagnéticos. En este caso, la propiedad termodinámica relevante es la magnetización. Smirnov demostró la invariancia conforme del modelo cuando la distancia entre átomos contiguos tiende a cero.

Otros grafos y otras dimensiones

Para explicar la teoría de la percolación, en este artículo hemos considerado el caso de un retículo hexagonal. Sin embargo, el fenómeno resulta mucho más rico.

Pensemos en un grafo: un conjunto de puntos (vértices) unidos entre sí por medio de líneas (aristas). Un alicatado hexagonal no representa más que cierto grafo: uno en el que los vértices son los puntos de intersección entre tres hexágonos, y las aristas, la frontera entre dos baldosas. La percolación por aristas sobre un grafo corresponde al proceso mediante el cual eliminamos una arista cualquiera con una probabilidad p. El resultado es un nuevo grafo con el mismo número de vértices pero con un subconjunto de las aristas originales.

De igual manera, puede estudiarse la percolación sobre un retículo de celdas cuadrangulares. Aunque con algunas diferencias, este modelo comparte numerosas propiedades con el retículo hexagonal. En particular, exhibe una transición de fase con las mismas propiedades. Esa clase de semejanzas entre modelos que en un principio parecían tan diferentes se denomina *universalidad*: las propiedades macroscópicas del sistema no dependen de su geometría local (hexagonal o cuadrangular), sino solo de las propiedades generales (en este caso, la independencia entre las caras o aristas).

Por otro lado, los procesos de percolación no se restringen al plano. El fenómeno puede estudiarse también sobre un retículo cúbico. Este caso resulta mucho más misterioso que el de un plano hexagonal, pues la existencia de una dimensión adicional complica en gran medida el análisis. Algunas de las preguntas más básicas sobre este modelo figuran entre los grandes problemas aún sin resolver de la teoría de la probabilidad. Conviene recordar que vivimos en un mundo tridimensional, por lo que este caso reviste un gran interés.

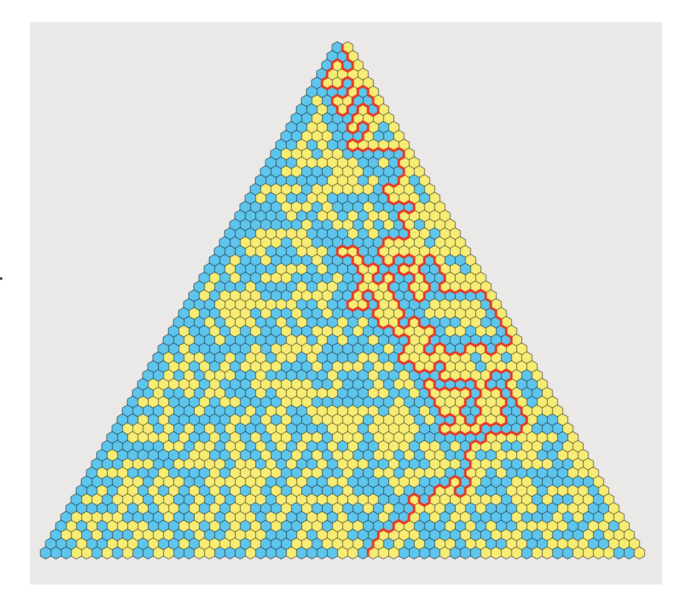
Aunque resulte paradójico, entendemos mucho mejor la teoría de la percolación en dimensiones mayores que tres. En tales casos, los grafos adoptan la apariencia de «árboles» (o grafos sin ciclos, en los que dos vértices cualesquiera se encuentran unidos por un camino único). La percolación en árboles resulta relativamente sencilla de analizar e interpretar en términos de filogenia, la disciplina que estudia la historia evolutiva de las especies.

Puede demostrarse que, al tomar el límite de escala de un modelo de física estadística en dos dimensiones, el resultado exhibe las mismas propiedades matemáticas que una teoría cuántica de campos bidimensional, en la que las excitaciones cuánticas se corresponden con partículas de masa nula. En general, en una teoría cuántica de campos, las partículas se identifican con las excitaciones del campo que transportan una energía y una cantidad de movimiento bien definidas. Los fotones, por ejemplo, aparecen como los cuantos de excitación del campo electromagnético. (Aunque los fotones también carecen de masa, la electrodinámica cuántica se diferencia del límite de escala de los modelos de física estadística en que sus partículas no «viven» en dos dimensiones, sino en tres dimensiones espaciales más el tiempo.)

En 1984, los físicos Belavin, Polyakov y Zamolodchikov —todos ellos de nombre Alexánder— demostraron que dichas teorías cuánticas de campos en dos dimensiones poseen un grupo de simetría inmenso: el *grupo de transformaciones conformes*. A este pertenecen las transformaciones geométricas del plano que, en cada punto, conservan el valor de los ángulos, pero no necesariamente las distancias. Los ejemplos más sencillos son las traslaciones, las rotaciones y las homotecias (dilataciones). Sin embargo, existen infinitas transformaciones conformes. De hecho, resulta posible demostrar que toda función analítica f de una variable compleja z se corresponde con una transformación conforme del plano. (Una función $f(z)$ es analítica si, en las proximidades de cualquier punto z_0, puede expresarse como una suma, quizás infinita, de potencias enteras de $(z - z_0)$). La notable propiedad BPZ abrió un nuevo campo de investigación en física: la teoría de campos conforme, una disciplina cuyas aplicaciones llegan hasta la teoría de cuerdas.

CUADRADOS, RECTÁNGULOS Y TRIÁNGULOS

En nuestro modelo de percolación, la propiedad BPZ implica que, en el límite de escala, la probabilidad de cruzar la cocina es la misma para dos salas de geometrías diferentes siempre y cuando una pueda convertirse en la otra por medio de una transformación conforme. Sobre esta base, el físico John Cardy dedujo en 1990 una expresión para la probabilidad límite. En el caso de un rectángulo, dicha fórmula presenta un aspecto

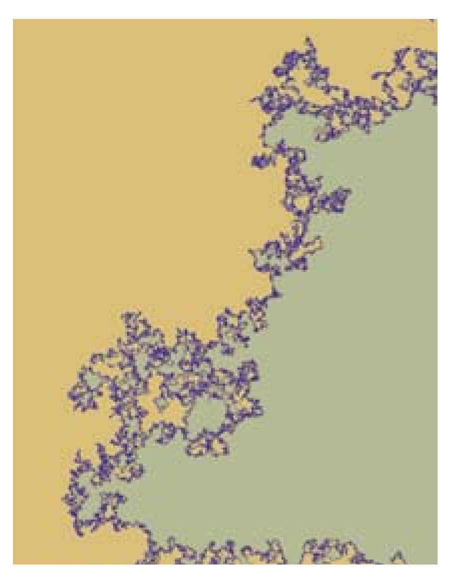


Un ejemplo de un proceso de exploración (*rojo*), con hexágonos amarillos a la derecha y azules a la izquierda. En el límite en el que el tamaño de los hexágonos tiende a cero, el camino se convierte en una curva aleatoria de tipo SLE (trayectorias de evolución de Schramm-Loewner).

ENSMP (*retículo cúbico*)

enrevesado en el que intervienen funciones hipergeométricas. Sin embargo, el matemático Lennart Carleson (galardonado con el premio Abel en 2006) demostró que la expresión de Cardy adoptaba una apariencia muy simple y elegante en el caso de una habitación con forma de triángulo equilátero.

A fin de relacionar una habitación triangular con los casos anteriores (habitaciones con cuatro muros), consideremos un triángulo equilátero de lado unidad y denotemos sus vértices por A, B y C. Ahora añadamos una cuarta «esquina» a nuestra sala triangular, D, a una distancia x de A. De esta forma, obtenemos una habitación de cuatro paredes: AB, BC, CD y DA. En este caso, la fórmula de Cardy nos dice que la probabilidad límite para atravesar la sala desde el muro DA hasta el opuesto, BC, es igual a x. El resultado no sorprende para el caso $x = 1/2$, ya que entonces podemos recurrir a un argumento similar al empleado en la habitación cuadrada. Sin embargo, resulta asombroso que la fórmula se reduzca a una expresión tan sencilla para otros valores de x.



Simulación de la curva de Schramm **SLE$_6$. En la teoría de la percolación, esta curva se relaciona con los procesos de exploración en el límite de escala: aquel en el que el tamaño de los compartimentos tiende a cero. La figura resultante es aleatoria y fractal.**

Para obtener su ecuación, Cardy utilizó resultados de la teoría de campos conforme que no habían sido demostrados con anterioridad. Hacía falta, pues, una prueba rigurosa. La última pieza la aportó en 2001 Stanislav Smirnov, de la Universidad de Ginebra. Por fin, 107 años después aparecía la respuesta solicitada por el editor de *The American Mathematical Monthly*, hoy conocida como fórmula de Cardy-Smirnov. La elegante demostración, para la que bastan apenas unas páginas, se basa en las propiedades de las transformaciones conformes. La hazaña le ha valido a su autor numerosos premios, entre ellos la prestigiosa medalla Fields, la cual le fue concedida en 2010.

FRACTALES Y CAMINOS ALEATORIOS

Ataquemos ahora la segunda pregunta de Maxime. Supongamos que nuestro amigo se encuentra en la cocina, de pie sobre la frontera entre un azulejo azul y otro amarillo. Su objetivo ahora consiste en atravesar la habitación caminando sobre las aristas de los hexágonos, pero de manera que siempre tenga un azulejo azul a la izquierda y uno amarillo a la derecha. ¿Cuánto tardará Maxime en llegar al otro lado?

Aquí debemos señalar que nuestro amigo carece de toda libertad de elección. Tras cada paso, descubrirá un nuevo azulejo frente a él (azul o amarillo), el cual determinará la dirección que deberá tomar (derecha o izquierda, respectivamente). La única duda aparecerá cuando alcance uno de los lados de la sala, en cuyo caso marchará a lo largo del borde en la dirección que le permita llegar al lado opuesto sin volver a cruzar el camino ya recorrido. La trayectoria que se obtiene al seguir el camino de Maxime se denomina curva de exploración. Para responder a la pregunta de Maxime, hemos de calcular la longitud de dicha curva.

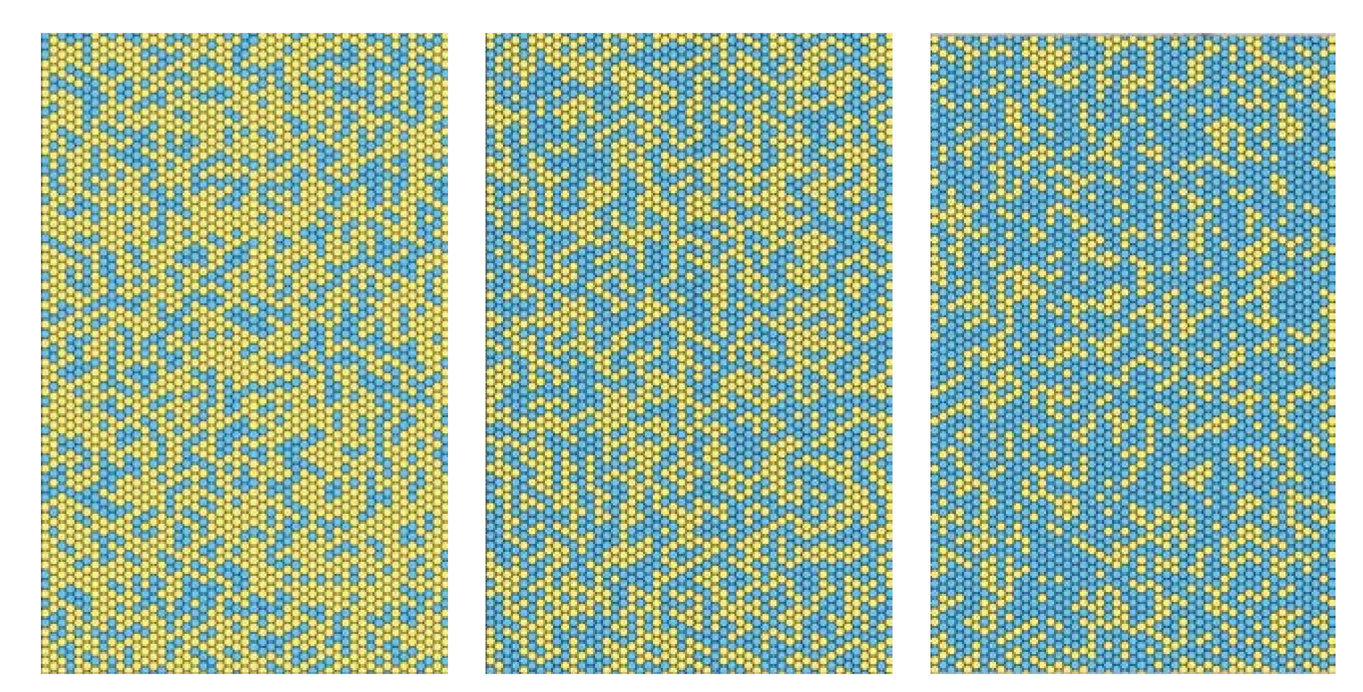
La curva de exploración puede interpretarse como una frontera entre dos dominios. Imaginemos que, a la derecha de Maxime, coloreada de amarillo, se encuentra la arena de una playa; a la izquierda, de azul, tenemos el mar. El proceso de exploración descrito se correspondería por tanto con recorrer la línea de costa. Además, el mar contiene islotes, y la playa, pequeñas lagunas.

Al igual que cuando estudiábamos la probabilidad de atravesar la habitación, también aquí podemos considerar el límite en el que los hexágonos adquieren un tamaño nulo. ¿Qué tipo de curva aparecería entonces como consecuencia del proceso de exploración? En 1999, Oded Schramm, matemático fallecido en 2008, introdujo un candidato natural para este tipo de trayectorias. Apoyándose en los resultados de Charles Loewner, Schramm descubrió una familia de curvas aleatorias sobre un plano, las cuales obtuvo a partir del movimiento browniano en una dimensión y gracias al empleo de transformaciones conformes. Dichas trayectorias continuas quedan parametrizadas por un número real k y se conocen como curvas SLE$_k$ (o curvas de evolución de Schramm-Loewner). Describen fractales aleatorios; es decir, trayectorias que adoptan un aspecto similar con independencia de la escala a la que las observemos. Schramm conjeturó que las curvas SLE$_k$ (en concreto, SLE$_6$ para el caso de la percolación) y el límite de escala de los modelos bidimensionales debían hallarse relacionados. En 2001, Smirnov logró una vez más una demostración rigurosa para el caso de la percolación.

Volvamos al número de pasos necesarios para atravesar la cocina. El resultado de Smirnov nos permite aproximar el camino de exploración por una curva continua de tipo SLE$_6$. No podemos calcular la longitud de esta última, ya que se trata de una curva fractal, por lo que su longitud sería infinita. Pero sí podemos calcular su *dimensión fractal*, una cantidad relacionada con el número de hexágonos de arista L necesarios para cubrirla por completo. Cuando L tiende a cero, observamos que dicho número crece como $1/L^{4/3}$, lo que impli-

La frontera entre la región oxidada y la intacta de esta placa de hierro se asemeja a una curva de tipo SLE. No en vano, los fenómenos de corrosión y los de percolación se hallan relacionados.

SIMULACIÓN DE VINCENT BEFFARA (*curva SLE$_6$*); J. GRACEY STINSON/POUR LA SCIENCE (*corrosión en metales*)



El aspecto global del retículo cambia de manera drástica cuando las probabilidades de que una baldosa sea azul o amarilla dejan de ser iguales. Aquí se reproducen tres simulaciones, correspondientes a un valor de p (la probabilidad de obtener una baldosa azul) igual a 0,35 (*izquierda*), 0,5 (*centro*) y 0,65 (*derecha*). Cuando $p < 1/2$, y en el límite en el que la sala es de tamaño infinito, la probabilidad de obtener un camino de percolación azul que la atraviese de lado a lado es nula. Cuando $p > 1/2$, dicha probabilidad resulta estrictamente positiva.

ca que la dimensión fractal de la curva de exploración es 4/3. Para el caso de una línea recta, el número de hexágonos aumenta como $1/L$, lo que se corresponde con una dimensión fractal igual a 1, como cabía esperar.

Hemos visto que el número de hexágonos de tamaño L necesarios para cubrir la curva de exploración discreta es del orden de $1/L^{4/3}$. Si las baldosas son hexágonos de arista L, dicho número coincidirá con el número de pasos necesarios para atravesar la habitación. Supongamos que el tamaño de los hexágonos del alicatado asciende a 10 centímetros (0,1 metros) y que la habitación mide diez metros de lado. En ese caso, puede demostrarse que Maxime necesitará unos $(10/0{,}1)^{4/3} \approx 464$ pasos para atravesar la cocina.

SISTEMAS CRÍTICOS

Nuestro modelo de percolación permite abordar otras cuestiones. Supongamos que uno de sus hijos hubiese engañado a Maxime con una moneda trucada: una que cae de un lado con probabilidad p y del otro con probabilidad $1 - p$, pero en la que el valor de p ya no es 1/2. Dicha manera de proceder cambiará de manera drástica el resultado: si $p < 1/2$, predominarán las baldosas amarillas; si $p > 1/2$, abundarán las azules.

Supongamos ahora que consideramos hexágonos cada vez menores o, de manera equivalente, hexágonos de tamaño fijo para alicatar una cocina cada vez más grande. En tal caso, una pregunta natural es la siguiente: si partimos del centro y avanzamos sin pisar más que baldosas azules contiguas, ¿qué probabilidad tendremos de alcanzar uno de los bordes de la sala?

Si $p < 1/2$, lo más probable es que nos encontremos en un islote azul del que no podremos escapar. Por tanto, la probabilidad de alcanzar el borde de la sala por medio de un camino azul tenderá a cero a medida que el tamaño de la cocina aumente. Por el contrario, cuando $p > 1/2$, la probabilidad de escapar permanecerá siempre por encima de cierto valor, con independencia del tamaño de la sala. En particular, en el caso de una cocina ilimitada, la probabilidad de que un hexágono dado forme parte de un camino azul infinito es siempre positiva. Este fenómeno, que constituye un ejemplo de transición de fase en la teoría de la percolación, fue demostrado en 1982 por Harry Kesten, de la Universidad Cornell.

Los físicos dicen que un sistema se encuentra en un *punto crítico* cuando una variación infinitesimal de los parámetros que lo definen cambia las propiedades globales del sistema. En este modelo de percolación, el valor $p = 1/2$ se corresponde con un punto crítico: si p toma un valor ligeramente inferior a 1/2, aparece un sendero amarillo que cruza la sala de lado a lado; pero para cualquier valor de p mayor que 1/2, veremos en su lugar un camino de baldosas azules.

El estudio de las transiciones de fase en torno al valor crítico de un parámetro constituye uno de los temas principales de la física estadística moderna. Los modelos de percolación reproducen dicho comportamiento a partir de una formulación sencilla. Y, como ocurre con otros modelos de física estadística, resultan de enorme utilidad para estudiar fenómenos físicos y biológicos, al tiempo que ofrecen a los matemáticos un campo de gran interés en el que aún queda mucho por explorar.

PARA SABER MÁS

Universalités et fractales. B. Sapoval. Flammarion, 1997.

Percolation. G. Grimmet. Springer, 1999.

Towards conformal invariance of 2D lattice models. S. Smirnov en *International Congress of Mathematicians*, vol. 2, págs. 1421-1451. European Mathematical Society, Zúrich, 2006. Disponible en **arxiv.org/abs/0708.0032**

Lectures on planar percolation with a glimpse of Schramm-Loewner evolution. V Beffara y H. Duminil-Copin, junio de 2011. **www.unige.ch/~duminil/publi/lecture_notes_percolation.pdf**



Chris Mooney es periodista científico, autor de varios libros y uno de los responsables del sitio de distribución de contenidos *Point of Inquiry* (www.pointofinquiry.org), perteneciente a una organización educacional sin ánimo de lucro.



LOS INCONVENIENTES DE LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA

Aunque fracturar una sola vez el terreno para extraer gas natural no tiene por qué contaminar el agua de la zona, hacerlo una y otra vez sí podría comportar problemas

Chris Mooney

¿Supone la fracturación hidráulica algún riesgo para las reservas de agua potable? Desde hace unos años, esta cuestión ha suscitado un agrio debate. En marzo del año pasado, Anthony Ingraffea, profesor de ingeniería en la Universidad Cornell y experto en esta controvertida técnica de extracción de gas natural, asistió a una convención auspiciada por la Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. (EPA, por sus siglas en inglés). En ella participaban expertos de las principales compañías de gas natural y de perforación de pozos, como Devon Energy, Chesapeake o Halliburton. El objetivo de la reunión consistía en analizar las consecuencias de la fracturación hidráulica, acusada de contaminar con gas y productos químicos las reservas de agua potable de varios estados. Desde hace un tiempo, la polémica no ha hecho sino arreciar en algunos estados de EE.UU. (Nueva York, Pensilvania, Texas y Colorado), así como en Australia, Canadá, Francia y otros países europeos (España entre ellos).

En su forma más básica, la fracturación hidráulica se ha venido empleando desde finales de la década de 1940. Cuando un eje de perforación vertical choca contra una capa de esquisto, se inyecta agua tratada con productos químicos con el objetivo de reventar la roca y liberar gas natural. Hace poco, sin embargo, a esa práctica se ha sumado la perforación direccional, u horizontal, que permite virar 90 grados y continuar horadando paralelamente a la superficie a lo largo de unos cuantos miles de metros. El resultado ha sido una auténtica *fiebre del gas*: desde entonces, numerosas capas aisladas de esquistos ricos en metano se han hecho accesibles. Se estima que EE.UU. dispone de más de 23 billones de metros cúbicos de este gas de esquisto «no tradicional», unas reservas que podrían durar decenios. Sin embargo, algunos correos electrónicos de la industria publicados por *The New York Times* en junio del año pasado sugieren que su extracción podría resultar más complicada de lo que algunas compañías dan a entender. El problema principal reside en que, a

EN SÍNTESIS

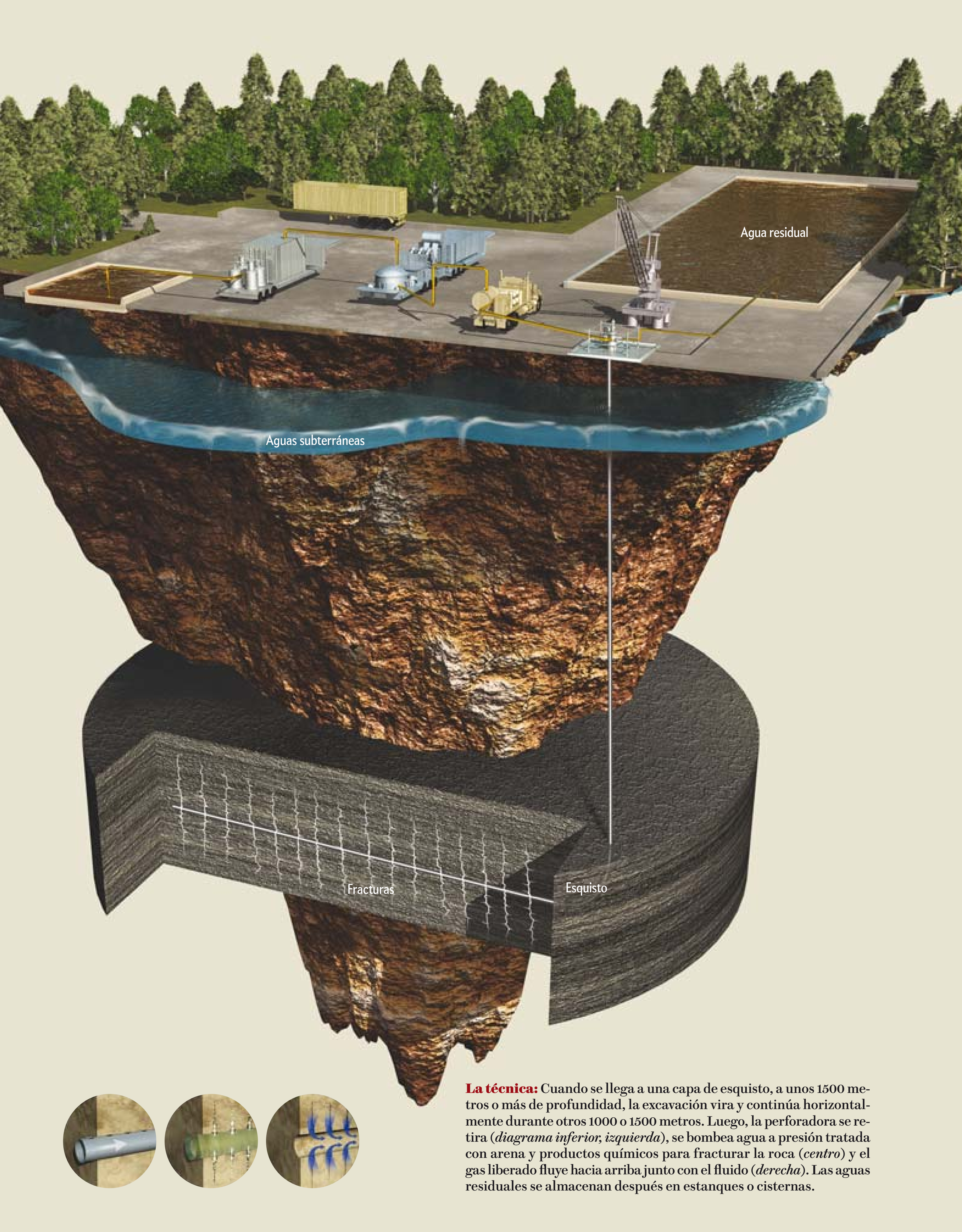
La fracturación hidráulica requiere inyectar agua a presión en las capas subterráneas de esquisto para liberar gas natural. Para facilitar la operación, esa agua se carga con compuestos químicos.

Una sola fracturación podría resultar inocua. Sin embargo, el ciclo industrial completo, que incluye el almacenamiento del agua de retorno, ya ha provocado algunos casos de contaminación de aguas.

Algunas medidas, como la introducción de trazadores químicos en el agua empleada para agrietar la roca, podrían aportar pruebas concluyentes sobre los riesgos de la fracturación hidráulica.

A pesar de todo, algunos organismos reguladores estadounidenses han decidido no esperar a que concluyan las investigaciones en curso. La técnica podría acabar aplicándose a gran escala.

DON FOLEY



La técnica: Cuando se llega a una capa de esquisto, a unos 1500 metros o más de profundidad, la excavación vira y continúa horizontalmente durante otros 1000 o 1500 metros. Luego, la perforadora se retira (*diagrama inferior, izquierda*), se bombea agua a presión tratada con arena y productos químicos para fracturar la roca (*centro*) y el gas liberado fluye hacia arriba junto con el fluido (*derecha*). Las aguas residuales se almacenan después en estanques o cisternas.

diferencia de la fracturación vertical, la perforación horizontal requiere enormes cantidades de agua y productos químicos. Después ha de almacenarse el agua de retorno que asciende tras la fracturación, lo que también comporta riesgos.

Durante el encuentro de marzo, Ingraffea escuchó a los expertos de la industria negar que la fracturación hidráulica fuese la causante de algunos casos documentados de contaminación de pozos de agua potable. También eximían a la técnica de provocar el agua inflamable que ha llegado a manar de algunos grifos domésticos. Según ellos, esos yacimientos resultaban hasta ahora difíciles de explotar debido a que entre las capas de esquisto y los acuíferos median miles de metros de roca. Puede que la técnica de fracturación sea potente, pero no tanto como para abrir nuevas fisuras a través de semejantes masas de roca y conectar las excavaciones horizontales (o «laterales») con el agua subterránea, próxima a la superficie.

«Sus presentaciones mostraban muy bien lo que ellos creen que ocurre», comenta Ingraffea, antiguo empleado de la multinacional de gas Schlumberger y, hoy, uno de los expertos más críticos de esta nueva fiebre. «En todas ellas, los ponentes concluían que algo así era del todo improbable», continúa. Pero aquellos análisis consideraban solo fracturaciones aisladas: una sola descarga de agua en un único lateral. Sin embargo, las compañías efectúan en ocasiones más de una docena de perforaciones verticales muy próximas entre sí, fracturan el lateral de cada pozo en varios tramos y, quizá, repetidas veces. Aunque Ingraffea duda de que una sola perforación lateral pueda conectar las capas de esquisto con la superficie, añade que si se consideran múltiples fracturaciones, las probabilidades aumentan: «¿Cuánto? No lo sé».

CUESTIÓN DE DEFINICIONES

Los científicos y los legisladores que ahora se enfrentan a tan compleja cuestión han llegado algo tarde: podrían haber empleado los resultados de las investigaciones realizadas *antes* de que la fracturación se convirtiese en una actividad tan polémica. La técnica ha causado un conflicto político en el estado de Nueva York, donde el Departamento de Conservación Ambiental reveló hace poco un plan para permitir que las compañías perforadoras pudieran acceder al 85 por ciento de la parte neoyorkina de las formaciones de Marcellus y de Utica. No se autorizaría la fracturación en las cuencas de la ciudad de Nueva York ni en las de Syracuse, ya que sus aguas llegan al ciudadano sin ningún proceso de depuración intermedia.

El departamento, que aprobó las explotaciones tras haber examinado varios estudios, sostiene que vigilará de manera muy estricta los trabajos de perforación. En la práctica, la decisión deja sin efectos una resolución previa que prohibía la fracturación en todo el estado. Y ello a pesar de que la EPA aún no ha concluido un estudio a gran escala sobre la seguridad de la técnica, cuyos resultados preliminares se esperan para finales de 2012. Pero el Departamento de Conservación Ambiental se hallaba poco dispuesto a aguardar las conclusiones de la EPA. Emitió su resolución en octubre y dio de plazo hasta diciembre para someterla a observaciones públicas.

El afán por comenzar con las perforaciones en el estado de Nueva York antes de que la EPA concluyese sus estudios ha obligado a los expertos a determinar qué acusaciones contra la práctica cuentan con cierto peso y cuáles merecen ser examinadas con más detalle. En última instancia, la solución depende de a qué definición de «fracturación hidráulica» deseemos acogernos.

Si por fracturación entendemos el proceso completo de extracción no tradicional de gas, entonces la técnica puede ser acusada de inmediato de varias infracciones graves. En primer lugar, se trata de una operación industrial que requiere entre 7,5 y 15 millones de litros de agua para cada lateral, y entre 55.000 y 225.000 litros de productos químicos; cifras que han de multiplicarse por el número de pozos perforados en cada yacimiento. El transporte de esos líquidos exige una flota de camiones cisterna y descomunales depósitos de almacenamiento.

Después hay que gestionar el agua de retorno, cuyo volumen asciende a un 75 por ciento de la inyectada en el terreno. Esta sube cargada no solo con un cóctel de productos químicos (añadidos al agua para que el líquido de fracturación fluya, para proteger el conducto y como bactericida, entre otros fines), sino con materiales radiactivos y sales procedentes del subsuelo. Esa agua tóxica debe almacenarse en el lugar de la explotación para, después, transportarse a plantas de tratamiento o reutilizarse. La mayoría de las compañías la depositan en fosos a cielo abierto. En EE.UU., numerosos estados exigen que el fondo de dichos depósitos se recubra de materiales sintéticos para evitar las infiltraciones. Otros exigen, además, que los fosos se encuentren alejados de las reservas de agua superficiales. Pero, a pesar de todo, los revestimientos pueden desgarrarse y los fosos pueden desbordarse cuando llueve demasiado. La normativa propuesta por el estado de Nueva York solo autorizará el depósito en tanques herméticos e impondrá medidas adicionales contra las fugas.

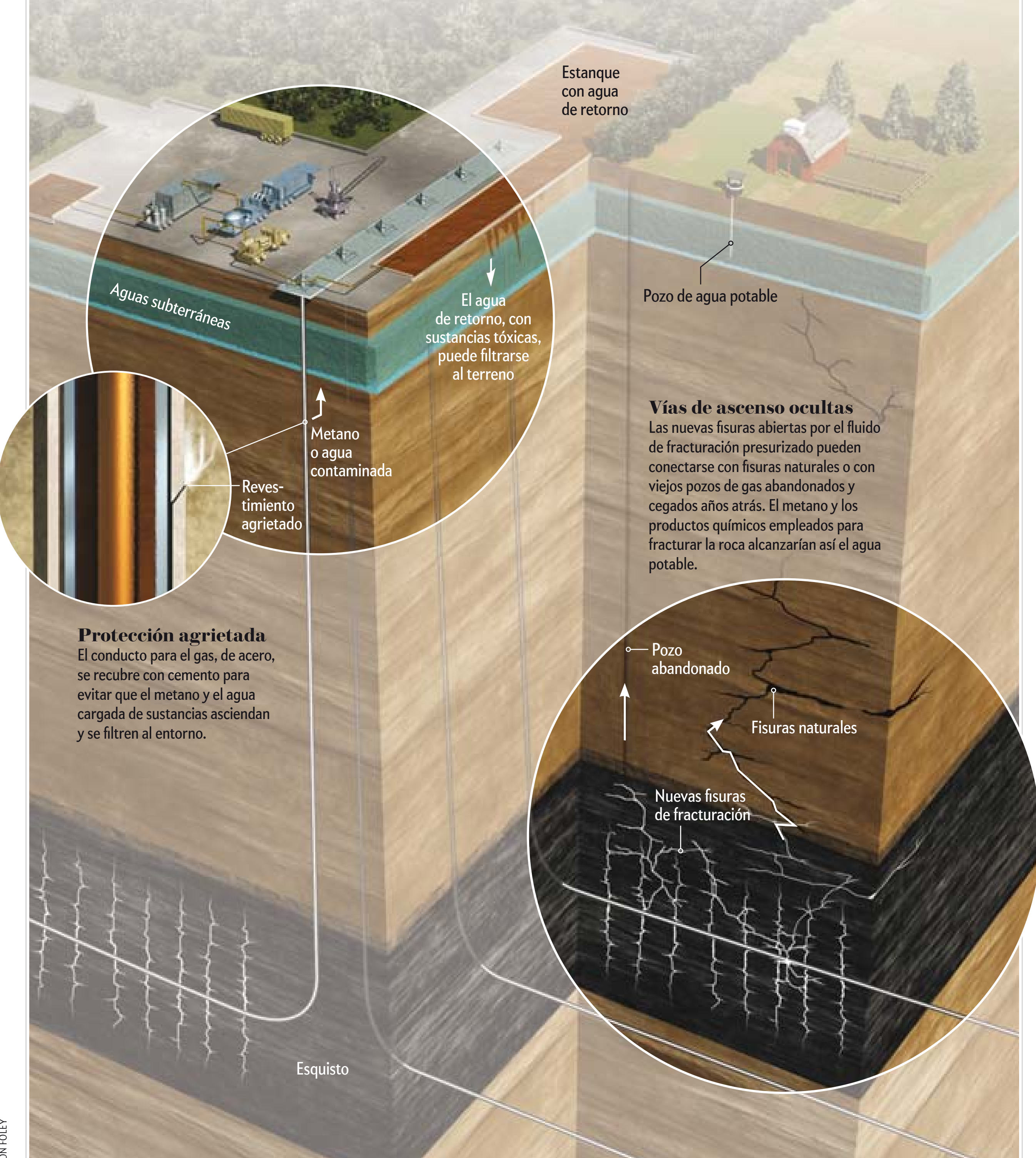
Todo lo anterior puede provocar accidentes. «No es una industria libre de riesgos», reconoce Terry Engelder, experto en fracturación hidráulica de la Universidad estatal de Pensilvania. Aunque en líneas generales ha defendido el proyecto, Engelder se ha mostrado crítico con las prácticas de algunas de las compañías. Algunos artículos publicados en *The New York Times* han denunciado la posible contaminación de algunas de las grandes cuencas fluviales en Pensilvania, como las de los ríos Susquehanna y Delaware, a causa de una manipulación deficiente de las aguas de retorno. En el mismo estado, algunos grifos domésticos han desprendido malos olores o incluso llamas, y las compañías han sido responsabilizadas y multadas. Hace poco, el Departamento de Conservación Ambiental impuso a la empresa Chesapeake una multa de casi un millón de dólares por haber contaminado con metano los pozos del agua de 16 familias como resultado de sus prácticas de perforación.

Los incidentes mencionados pueden achacarse al proceso de fracturación si con ello nos referimos a todo el ciclo industrial, pero no necesariamente a la tromba de agua subterránea que fractura la roca. Incluso los más versados en el tema difieren sobre este punto básico. «La exposición al aire libre de tales volúmenes de sustancias químicas constituye una vulnerabilidad real, pero se trata de una amenaza de tipo industrial antes que de una debida a la fracturación en sí», aduce Val Washington, antigua subcomisaria del Departamento de Conservación Ambiental de Nueva York. Ingraffea lo ve de otra manera: «Ojalá la industria dejase de jugar a "no es la fracturación lo que contamina". Para fracturar la roca hay que perforarla primero. Se están ocultando tras una cuestión semántica».

Para demostrar que el problema reside en la fracturación tal y como la define la industria, habría que examinar la que se ha convertido en la más publicitada y, a la vez, la más incierta de todas las amenazas: la posibilidad de que las explosiones de agua a gran profundidad puedan contaminar el agua potable a través de inesperadas vías que comuniquen el esquisto con los acuíferos, mucho más cercanos a la superficie.

Riesgos para el agua potable

Para extraer todo el gas de la capa de esquisto, una perforadora puede llegar a abrir más de una docena de pozos. Los riesgos de la práctica son fundamentalmente tres. En primer lugar, el agua empleada para fracturar la roca se carga con sustancias nocivas; cuando esa agua regresa a la superficie y se almacena (*centro*), puede acabar infiltrándose en el terreno o rebosando, como ya ocurrió el pasado mes de septiembre en Pensilvania a causa de la tormenta tropical Lee. Además, los revestimientos de cemento del conducto vertical pueden agrietarse (*inserto, izquierda*) y las nuevas fisuras abiertas por la fracturación podrían acabar conectándose con aberturas naturales o con pozos antiguos (*inserto, derecha*).



DON FOLEY



Una normativa estricta podría ser la clave para ganarse a los ciudadanos, temerosos de unas prácticas de perforación arriesgadas. En la fotografía, una manifestación en Albany (estado de Nueva York) contra la técnica de fracturación hidráulica (*fracking*).

MIKE GROLL, AP PHOTO

CEMENTO DEFECTUOSO

Para entender cuán compleja resulta la cuestión, puede que sea útil recordar la acción legal que la EPA emprendió en 2010 contra Range Resources, una compañía de gas radicada en Texas y que explota los yacimientos de la formación de Barnett. La EPA había concluido que dos pozos de agua potable cercanos a las excavaciones de la compañía se hallaban contaminados con metano de origen «termogénico» profundo. Ese tipo de gas se origina en las capas de esquisto, a diferencia del metano «biogénico» producido por microorganismos en las bolsas más próximas a la superficie, donde suelen hallarse los acuíferos. Además, según la EPA, uno de los pozos contenía compuestos químicos empleados en ocasiones para fracturar la roca, como benceno, y estaba suministrando agua inflamable.

Entre otras medidas, la EPA ordenó a la compañía que proveyese de agua potable a las partes afectadas y que comprobase si otros pozos de la zona se hallaban contaminados. Range Resources defendió con firmeza su inocencia ante los tribunales, esgrimiendo a su favor las «largas distancias horizontales y verticales» que separaban sus yacimientos de los pozos. A mediados de septiembre, la causa había llegado al Tribunal de Apelaciones de EE.UU. Llegados a este punto, resulta fundamental observar que, aun cuando Range Resources cargue con la responsabilidad, ello no implica que la fracturación hidráulica causase el problema. La EPA pidió a la compañía que determinara qué «vías de flujo de gas» pudieron haber provocado los incidentes. Las posibilidades abundan: el gas pudo haber ascendido desde el esquisto fracturado a través de cualquier camino, o un cemento mal aplicado en la parte vertical del pozo, más cercana a la superficie, pudo haber facilitado el paso.

De hecho, las principales sospechas recaen sobre las capas de cemento defectuosas. Al excavar un pozo, este debe atravesar las capas próximas a la superficie, donde se encuentran los acuíferos, así como bolsas de gas desconocidas. El espacio entre la tubería y las paredes del pozo se rellena con cemento, a fin de evitar que el gas ascienda por el exterior del conducto y se infiltre en el agua subterránea. Un fallo en el revestimiento provocaría, asimismo, fugas del agua de retorno.

Según Anthony Gorody, hidrólogo, consultor de compañías de gas y defensor de la técnica de fracturación, el cemento constituye el punto débil más obvio. Otros expertos coinciden: «Si ejecutamos mal un revestimiento, dejamos el camino libre para una posible fuga», explica Robert B. Jackson, ecólogo y experto en recursos hidrológicos de la Escuela Ambiental Nicholas de la Universidad de Duke. A pesar de que la normativa que regula el encementado es amplia y de que la industria se ha esforzado en mejorar la técnica, el problema podría no admitir una solución definitiva. «Un porcentaje importante de los revestimientos de cemento fallará», advierte Ingraffea. «Siempre será así. Es parte de las reglas del juego.»

La contaminación a causa de un cemento mal aplicado supone un problema que viene de largo en los pozos verticales tradicionales, donde a veces también se realizaban fracturaciones. Como explica Washington: «Al oeste de Nueva York existen numerosos pozos que llevan decenios produciendo petróleo y gas, y la fracturación era el único modo de explotar un esquisto tan duro. Esa situación se ha prolongado durante unos veinte años». Lo que ha cambiado con la perforación horizontal, prosigue, es la cantidad de agua requerida: «A causa de la profundidad de las excavaciones y debido a la combinación de fracturación y perforación direccional, en lugar de 300.000 litros de agua ahora necesitamos varios millones de litros para cada fracturación». Ello implica un aumento considerable de la cantidad de compuestos químicos necesarios.

OTROS RIESGOS

Las deficiencias en el encementado explican unos cuantos casos de contaminación de aguas causada por perforaciones no tradicionales, incluida la infracción que costó a Chesapeake un millón de dólares. «Las fugas de metano suponen un problema en algunas zonas, eso es absolutamente cierto», reconoce Engelder. Pero la verdadera cuestión es si existen otras causas. Si todo problema con las aguas subterráneas se debiese al cemento, podría aducirse que la fracturación hidráulica, tal y como la define la industria, consigue un aprobado. En tal caso, solo haría falta una legislación más estricta sobre las actividades de perforación, como acaba de proponer el estado de Nueva York.

El trabajo más interesante sobre las posibles migraciones de gas se expone en un artículo que Jackson y otros colaboradores publicaron en fecha reciente en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. Su contenido concierne a ecologistas y profesionales de la industria por igual.

El equipo de Jackson analizó muestras procedentes de más de 60 pozos privados de agua potable situados sobre las formaciones de esquisto de Marcellus, al noreste de Pensilvania, y la de Utica, al norte del estado de Nueva York. Hallaron metano en 51 de ellos; los más cercanos a las excavaciones contenían más. Los análisis químicos determinaron que gran parte del metano era de origen termogénico profundo, más que de tipo biogénico.

No obstante, ninguna de las muestras contenía ni fluidos de fracturación ni las sales habituales de las capas de esquisto profundas. En consecuencia, Jackson apunta a los revestimientos de cemento defectuosos como causa más probable de la contaminación. Señala también otra posibilidad: las fracturaciones podrían haber abierto grietas ascendentes más allá de la capa de esquisto, y estas se habrían conectado a otras fisuras ya existentes, lo que habría proporcionado al gas un camino de ascenso hacia el agua potable. El nordeste de Pensilvania y el norte de Nueva York se encuentran plagados de pozos abandonados. Como observa Jackson: «Decenios atrás, la gente no revestía los pozos con cemento ni los cegaba cuando se agotaban. Imagine un queso de Gruyère cuyos agujeros se adentrasen cientos de metros hacia abajo. No sabemos dónde se encuentran».

Sin embargo, si el metano puede alcanzar el agua potable a causa de las grietas abiertas por las perforaciones horizontales, ¿por qué no ocurre lo mismo con los productos químicos empleados en la fracturación? Al respecto, Jackson y Engelder solo pueden hacer conjeturas. Cuando se libera el gas de la roca, la presión inicial basta para impulsar el agua con los productos químicos hacia arriba. Pero quizás esa corriente se atenúe con rapidez; más tarde, el gas podría continuar ascendiendo, pero el agua no.

A pesar de todo, si las fracturas llegasen a conectarse con fisuras preexistentes o con pozos antiguos, los productos químicos bien podrían representar un riesgo para las aguas subterráneas. Kevin Fisher, ingeniero de Pinnacle Technologies, ha examinado miles de fracturas en las perforaciones horizontales de las formaciones de Barnett y Marcellus. Tras medir su longitud con un equipo de detección microsísmica, Fisher halló que la más extensa en la formación de Marcellus contaba con una extensión vertical de 600 metros. «Eso implica una separación física muy buena entre el extremo superior de las fracturaciones y los acuíferos», afirma.

Otros ingenieros no han obtenido las mismas conclusiones. En la Columbia Británica, en Canadá, los reguladores catalogaron 19 incidentes de «comunicación entre fracturaciones»: pozos recientes que acabaron conectados de manera inesperada con otros ya existentes. En uno de los casos, la comunicación se dio entre pozos que se encontraban a más de 600 metros de distancia. Tal y como advirtió a las compañías explotadoras la Comisión de Gas y Petróleo de la Columbia Británica: «Las conexiones subterráneas debidas a las operaciones de fracturación hidráulica a gran escala se han mostrado difíciles de predecir». El organismo añadía que la longitud de las fracturas podía extenderse más de lo previsto a causa de una resistencia insuficiente de las capas de roca superiores.

Nada de lo anterior demuestra que la fracturación de una capa de esquisto horizontal haya contaminado directamente un acuífero. Lisa Jackson, administradora de la EPA, declaró en fecha reciente que no se había documentado ningún caso, aunque añadió que existían investigaciones en curso. No obstante, la falta de pruebas no demuestra que el riesgo no exista. *The New York Times* y el Grupo de Trabajo Ambiental (una organización estadounidense sin ánimo de lucro) denunciaron hace poco un supuesto caso de contaminación que dataría de 1984, en el que un pozo fracturado en Virginia Occidental habría atravesado un pozo abandonado y contaminado el agua potable. La industria impugna la validez del alegato.

¿DEMASIADO TARDE?

En cualquier caso, para condenar o absolver la fracturación —la definamos como la definamos— se necesita más información. Por ello, el estudio de la EPA se propone examinar las diferentes posibilidades: fosos sin revestimientos y con fugas, encementados deficientes, o las vías de comunicación entre fracturas profundas y la superficie. La agencia estudiará cinco supuestos casos de contaminación de aguas subterráneas para determinar las causas (dos de ellos en Pensilvania) y controlará las actividades de perforación en otros dos yacimientos. Asimismo, empleará modelos computacionales para simular lo que ocurre en las profundidades hurtadas a la observación directa.

Ingraffea aconseja desarrollar un modelo que logre iterar un escenario con múltiples pozos, un gran número de fracturaciones y la circulación del gas y el líquido en un volumen de unos cuatro kilómetros cúbicos de roca a lo largo de varias semanas de perforación. «Se necesitarán ordenadores de gran potencia», afirma. Ingraffea sostiene que tales modelos servirían, como mínimo, para indicar bajo qué circunstancias la migración del gas resulta más probable.

Pero hallar un modelo de tales características puede resultar complicado. En la actualidad, el código que suele emplearse para simular reservas subterráneas —y el que la EPA planea utilizar— se denomina Tough2. Para Ingraffea, sin embargo, dicho modelo no goza de calidad suficiente. Las grandes compañías usan sus propias simulaciones y, en su opinión: «Lo mejor de lo mejor en cuanto a recursos humanos, programas, instrumental y calidad de datos se encuentra hoy en manos de las compañías explotadoras y de servicios». Ingraffea duda de que Tough2 logre manejar con la precisión necesaria todos los detalles que intervienen en la propagación de las fracturaciones.

Mientras tanto, Jackson y Gorody convienen en que la EPA debería realizar controles químicos en los pozos de agua potable antes y después del inicio de las perforaciones en los nuevos yacimientos. Solo los compuestos químicos hallados tras el inicio de las perforaciones podrían contrarrestar el argumento que suele esgrimir la industria: que las aguas ya se encontraban contaminadas con anterioridad.

Geoffrey Thyne, geólogo de la Universidad de Wyoming y experto en yacimientos petrolíferos, propone otra manera de resolver el rompecabezas de la fracturación: obligar a las compañías a añadir trazadores químicos a los líquidos de fracturación. Si el compuesto aparece donde no debe, ello supondría una prueba incontrovertible. Tyne sostiene que introducir un trazador debería ser «relativamente sencillo», si bien añade que gran parte de la industria no contempla la sugerencia con buenos ojos. La EPA afirma estar «considerando» el uso de trazadores. También avisa de que gran parte de la información recibida acerca de los productos químicos empleados en la fracturación ha sido declarada como «información empresarial confidencial» por parte de las compañías, motivo por el que la EPA no la ha puesto a disposición del público. Esa situación podría cambiar si se tomasen las medidas legales oportunas.

Puede que los estudios de la EPA y otros similares arrojen algo de luz sobre toda una serie de alegaciones complejas y antagónicas. Aun así, las conclusiones quizá lleguen demasiado tarde. Según Amy Mall, analista del Consejo de Defensa de los Recursos Naturales: «La fracturación nunca ha sido investigada a conciencia. Se trata de un experimento a gran escala que carece de parámetros científicos sólidos que lo guíen».

Quienes en Nueva York, Pensilvania y otros estados se oponen a la fracturación hidráulica suelen manifestarse con una misma pancarta: una en la que aparece la palabra «FRACK» rodeada por una circunferencia roja y atravesada por una línea. Lo más irónico es que, aunque muy probablemente las compañías de gas hayan cometido negligencias en sus actividades de perforación de pozos y disposición de residuos, la fracturación hidráulica en sí podría salir absuelta. Y aunque esas señales de prohibición no estarían justificadas, sí lo estarían los temores.

PARA SABER MÁS

Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. Stephen G. Osborn et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 108, n.º 20, págs. 8172-8176, 17 de mayo de 2010. **www.nicholas.duke.edu/cgc/pnas2011.pdf**

Environmental protection agency draft plan to study the potential impacts of hydraulic fracturing on drinking water resources. EPA, febrero de 2011. Disponible en **www.epa.gov/research**

Revised draft supplemental generic environmental impact statement on the oil, gas and solution mining regulatory program. Departamento de Conservación Ambiental del Estado de Nueva York, septiembre de 2011. **www.dec.ny.gov/energy/75370.html**

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Limaduras que trazan círculos

¿Por qué la limalla de hierro depositada sobre la superficie del agua no se alinea con el campo magnético?

En 1991, Hristo Ditchev publicaba un resultado que contradecía casi dos siglos de observaciones. Al someter a la acción de un imán la limalla de hierro que flotaba en el agua, cualquier físico esperaría que el resultado fuesen líneas concurrentes. Sin embargo, el ingeniero búlgaro observó que se formaban anillos concéntricos. ¿Acaso una nueva propiedad del campo magnético había pasado desapercibida durante generaciones?

Según aprendemos en la escuela, las limaduras de hierro se agrupan siguiendo las líneas del campo magnético del imán, curvas cuya tangente en cada punto indica la dirección del campo magnético. De hecho, también este fenómeno merecería una explicación. Todo campo magnético llena el espacio de manera continua. Entonces, ¿por qué las alineaciones de limaduras se separan unas de otras? Desde luego, enseñar física a un alumno curioso puede llegar a convertirse en una ardua tarea.

El experimento con la limalla de hierro es clásico. Se coloca un imán bajo una hoja de papel o una placa de vidrio, y después se espolvorea con limalla de hierro fina. Por último, se golpetea la superficie para que las limaduras se dispongan poco a poco en curvas que se dirigen de un polo a otro.

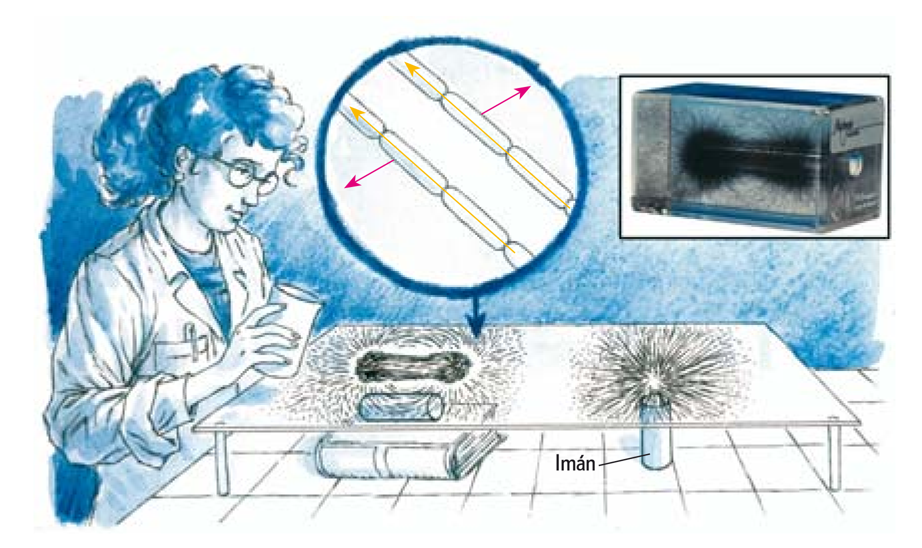
¿Atracción o repulsión?

Al observarlas de cerca, se comprueba que las partículas, de forma alargada, se alinean. ¿Por qué? Una cuenta esférica de hierro situada en un campo magnético adquiere una imantación paralela a la dirección del campo. En cambio, las limaduras, semejantes a pequeñas agujas, adquieren una imantación dirigida a lo largo de su eje incluso cuando se colocan oblicuas al campo magnético. Cada limadura se comporta entonces como una pequeña brújula, por lo que, si puede rotar, se alineará en la dirección del campo. De esta manera, las limaduras se disponen con el polo norte de una en contacto con el polo sur de la siguiente, con lo que acaban formando una línea.

A lo largo de cada línea, la configuración magnética de las limaduras permanece estable. En cambio, dos líneas de limalla contiguas se repelen, pues sus imantaciones presentan la misma dirección y el mismo sentido (tal y como harían dos imanes colocados uno junto al otro). Ello impide que las líneas se junten. Así, se crea un equilibrio entre la repulsión que experimentan dos filamentos contiguos y la atracción de las limaduras hacia las zonas en las que el campo magnético es más intenso.

¿A qué se debe el golpeteo tras haber esparcido la limalla? A causa del rozamiento con la superficie, las limaduras solo se mueven si las fuerzas magnéticas superan cierto valor umbral. Gracias a los golpes, las limaduras abandonan el lugar en el que cayeron y adoptan la configuración energética más favorable: una disposición en fila india a lo largo de las líneas de campo, con las líneas de limalla separadas entre sí cierta distancia debido a la repulsión mutua.

Aunque el resultado puede cobrar un aspecto magnífico, depende en gran medida de la habilidad del experimentador, que no debe percutir la superficie mucho ni poco. A fin de asegurar un bonito trazo, los físicos decidieron sustituir el papel o el vidrio por un líquido que contuviera limalla muy fina en suspensión. Para que las limaduras no se sedimenten demasiado rápido, se emplea aceite siliconado muy viscoso. En el centro del recipiente se coloca entonces una barra imantada y,

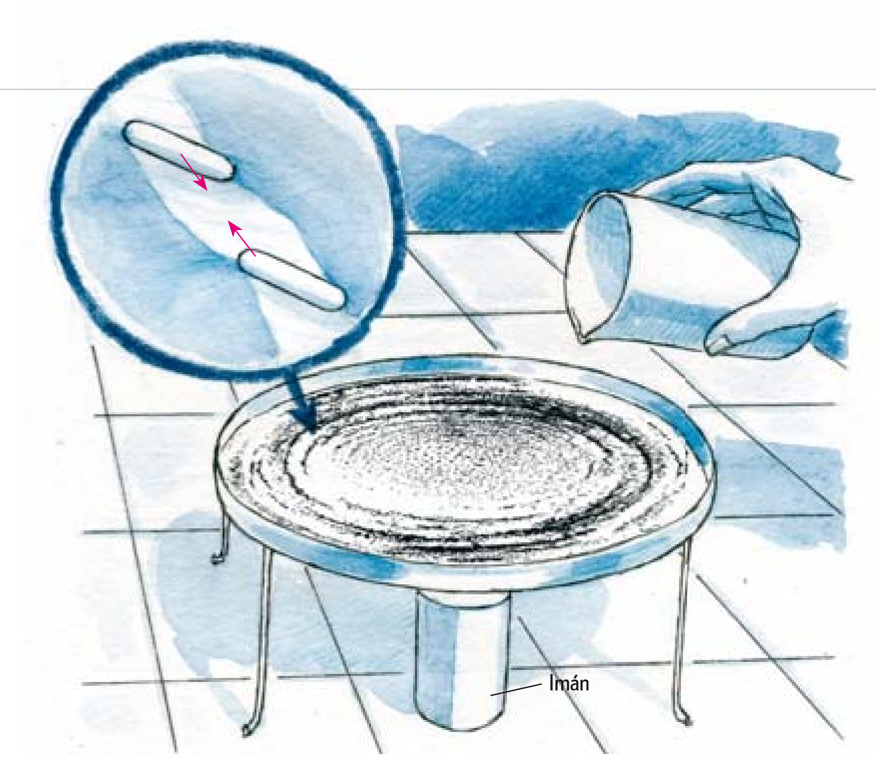


La limalla de hierro espolvoreada sobre una placa de vidrio bajo la cual hay un imán se ordena siguiendo las líneas del campo magnético. Las pequeñas partículas de hierro, de forma alargada, adquieren una imantación paralela a su eje y se atraen entre sí a lo largo de una misma línea. En cambio, dos líneas paralelas y contiguas se repelen (*flechas rojas*), pues sus imantaciones (*flechas naranjas*) poseen la misma dirección y el mismo sentido, lo que provoca la separación de las líneas de limalla. La configuración de las líneas de campo puede obtenerse en tres dimensiones empleando una suspensión líquida de partículas de hierro (*inserto*).

BRUNO VACARO

poco a poco, aparece una bella representación tridimensional de las líneas de campo magnético.

Sin embargo, las limaduras pueden moverse con libertad, por lo que tienden a confluir hacia los polos del imán. ¿Cómo evitar esa migración? Una solución consiste en emparedar la suspensión entre dos láminas de mylar (un material plástico fino, resistente y transparente), de manera que el «bocadillo» resultante se asemeje a una película plástica gruesa. El fluido se elige con una viscosidad lo bastante elevada como para que a las limaduras les cueste desplazarse, pero no tanta que les impida rotar sobre sí mismas. De esta manera, se alinearán en la dirección del campo magnético. Cuando el campo —y, por tanto, las limaduras— se oriente según la dirección de observación, la película aparecerá translúcida; cuando el campo discurra en la dirección perpendicular a la línea de visión, se mostrará opaca. Este experimento proporciona una manera sencilla de visualizar la dirección del campo magnético.



Si las limaduras se depositan con cuidado sobre la superficie del agua, se organizarán en anillos concéntricos, no en líneas radiales. El fenómeno se explica por medio de las fuerzas de capilaridad del agua. Las limaduras, que tienden a orientarse en la dirección del campo magnético, deforman la superficie del agua, pero la deformación global disminuye cuando dos partículas contiguas se acercan (como dos canicas sobre una malla elástica). Resulta así una atracción de naturaleza capilar, opuesta a la repulsión magnética entre las partículas.

BRUNO VACARO

Capilaridad y magnetismo

A fin de evitar las acumulaciones de limalla y el rozamiento viscoso, Ditchev decidió depositar con sumo cuidado la limalla sobre un recipiente con agua. Aunque más densas que el líquido, las limaduras no se hunden debido a la tensión superficial del agua: su superficie actúa como una membrana elástica y, gracias a las fuerzas capilares, puede soportar pequeños pesos sin desgarrarse. Sin embargo, al colocar bajo el recipiente un imán en posición vertical, Ditchev observó cómo la limalla, en lugar de alinearse con las líneas del campo (líneas radiales que parten del polo del imán), trazaba círculos concéntricos.

Cuando el anónimo descubridor envió sus resultados a la revista *European Journal of Physics*, el editor se sintió tan intrigado que intentó reproducir el efecto, sin lograrlo. Ditchev le envió entonces su polvo de hierro búlgaro, junto con explicaciones detalladas sobre el procedimiento. El editor repitió el experimento y observó, para su gran sorpresa, cómo se formaban los «anillos de Ditchev». Tras lo cual, se avino a publicar el artículo.

¿A qué se deben esos anillos? Dichos trazos aparecen como consecuencia de una competición entre las fuerzas magnéticas y las de capilaridad del líquido. Esa explicación, sugerida por el editor de la revista, sería confirmada unos meses después. Cada limadura deforma la superficie del agua por efecto de su peso y en la orientación que le impone el campo magnético. Ahora bien, la superficie del agua tiende a minimizar su deformación, tal y como haría una película elástica. Esa propiedad provoca, según los casos, un efecto de atracción o de repulsión entre las limaduras. Veamos cómo.

En la zona situada sobre el polo del imán, la limalla tiende a orientarse en la dirección vertical. Por tanto, cada limadura eleva la superficie del agua en uno de sus extremos y la empuja hacia abajo por el otro. Esa distorsión de la superficie del líquido se acentúa cuando dos limaduras con la misma orientación se sitúan una detrás de la otra. Por tanto, la deformación disminuirá si esas limaduras se separan. El fenómeno provoca que entre dos limaduras situadas sobre una misma línea de campo se genere una fuerza de repulsión: por un lado, ambas limaduras se sienten atraídas por el polo del imán; por otro, se repelen una a la otra. Como resultado, permanecerán separadas y se distribuirán de manera regular. Ese es el dibujo que se observa sobre la superficie del agua en la zona situada justo encima del polo del imán.

Más lejos del centro, la intensidad del campo magnético es menor y su orientación, más horizontal, por lo que las limaduras deforman menos la superficie. En este caso, sí pueden crearse filamentos de limaduras dispuestas en fila india. Consideremos dos filamentos próximos y paralelos. La deformación global de la superficie disminuirá si esos filamentos se acercan, motivo por el que aparece una atracción entre ambos análoga a la que experimentan dos canicas colocadas sobre una membrana elástica. Atracción en este caso, pero repulsión, similar a la que hemos visto entre dos limaduras, si dos filamentos se suceden en una misma línea. Como resultado, las fuerzas de capilaridad entre dos filamentos se oponen a la fuerza magnética. Cuando dominan los efectos de la capilaridad, los filamentos paralelos se agrupan, mientras que los filamentos sobre una misma línea de campo se repelen. En consecuencia, aparecen anillos densos y nítidos. Fin del misterio.

PARA SABER MÁS

Apparent circulation of a steady magnetic field. H. Ditchev en *European Journal of Physics*, vol. 12, págs. 101-102, 1991.

The formation of Ditchev rings. R. K. W. Haselwimmer en *European Journal of Physics*, vol. 13, págs. 145-151, 1992.

por Gabriel Uzquiano

Gabriel Uzquiano es profesor de filosofía en la Universidad de California del Sur.



El problema del censor

Interceptando series infinitas de caracteres

El siguiente problema se debe al matemático Andréi Kolmogórov, quien lo planteó a una audiencia de estudiantes de secundaria de la antigua Unión Soviética a principios de los años sesenta del siglo pasado. Tal como Dennis Shasha y Cathy Lazere describen el episodio, el problema de Kolmogórov nos pide que fijemos un repertorio de caracteres como el alfabeto de un lenguaje, y que definamos una *palabra* como una secuencia finita de caracteres de ese alfabeto. Ahora, supongamos que existe un repertorio de palabras prohibidas que un censor debe interceptar. Si una palabra no se encuentra entre las prohibidas, entonces es permisible. Kolmogórov planteó a su audiencia la siguiente pregunta: dada una secuencia infinita de caracteres del alfabeto que hemos fijado, ¿es posible dividirla en palabras de tal manera que *todas* ellas sean palabras prohibidas, o bien *todas* estén permitidas?

Un ejemplo sencillo

Supongamos que nuestro alfabeto contiene tan solo dos caracteres: *a* y *b*. Una palabra no es más que una secuencia finita compuesta a partir de esas dos letras: *ababababab*, *aaaaaa*, *bbbbaba*, etcétera. ¿Qué palabras están prohibidas? Supongamos que a este grupo pertenece la palabra *a*, así como cualquier otra que incluya un bloque de dos o más ocurrencias consecutivas de *a*. Secuencias como *baa*, *baaabaa* o *aaa* constituirían ejemplos de palabras prohibidas.

A partir de ahora, subrayaremos las palabras prohibidas a fin de facilitar su identificación. Un mensaje no es más que una secuencia de palabras del lenguaje. La tarea del censor consiste en identificar las palabras prohibidas que aparezcan en un mensaje. Si este se corresponde con $\underline{aaa}$ *ba ab*, entonces el censor debe denunciarlo como subversivo. Si el mensaje no contiene ninguna palabra prohibida —como, por ejemplo, *b bab aba*—, el censor debe permanecer en la sombra.

Ahora bien, la labor del censor se complica cuando el mensaje se transmite sin cortes que indiquen dónde acaba una palabra y dónde comienza la siguiente. Supongamos que el texto interceptado es:

baabbaba.

Nuestro censor cuenta con varias opciones a la hora de analizar el mensaje. Si se trata de un censor benevolente, tal vez se sienta inclinado a interpretarlo de manera inocua:

ba ab ba ba.

Pero, si pone gran celo en su trabajo, entonces tal vez insista en que una posible manera de analizar el mensaje es:

b $\underline{aa}$ *bba ba,*

el cual contiene una palabra prohibida.

Pero imaginemos que se trata de un censor benevolente, dispuesto a emplear la menor excusa para evitar inmiscuirse en la transmisión del mensaje. La existencia de una sola interpretación según la cual el texto incluya únicamente palabras permisibles le basta para clasificar el mensaje como inocuo y no denunciarlo. Con todo, por muy magnánimo que sea nuestro censor, siempre se verá obligado a denunciar mensajes como el siguiente:

baaab,

ya que resulta imposible analizar un texto como el anterior de manera que no incluya la palabra *a* ni alguna que contenga el bloque *aa*. Por ejemplo:

ba $\underline{aab}$
$\underline{baa}$ *ab*
b $\underline{aaa}$ *b*
ba $\underline{a}$ *ab*

Por otra parte, suponiendo que el mensaje contenga al menos dos palabras, parece que tampoco existe ninguna interpretación que incluya *solo* palabras prohibidas. Basta con que una de las ocurrencias de *b* aparezca por sí sola o junto a una sola ocurrencia de *a* para que el texto contenga al menos una palabra permisible.

Para nuestro benevolente censor, casos como el anterior le resultan sumamente incómodos. Aunque, por un lado, tiene la seguridad de que el mensaje incluye una o más palabras prohibidas, las consecuencias de una denuncia resultan lo suficientemente serias como para despertar su conciencia. Por ello, se sentiría mucho mejor si pudiera encontrar una manera de analizar el mensaje según la cual *todas* las palabras estuviesen prohibidas. Así podría convencerse de que un mensaje con tales características se antoja claramente subversivo y merece ser denunciado.

¿Qué ocurre en el caso de un texto infinito? Consideremos la siguiente secuencia infinita de caracteres:

baaabaaabaaa···

No parece posible analizar este mensaje de tal manera que solo incluya palabras permisibles. Es más, el censor puede interpretar el mensaje de modo que todas las palabras estén prohibidas:

$\underline{baa}$ $\underline{a}$ $\underline{baa}$ $\underline{a}$ $\underline{baa}$ $\underline{a}$ $\underline{baa}$ ...

La posibilidad de una transgresión tan radical tranquiliza la conciencia de nuestro censor, que ahora no duda en denunciar el mensaje.

Existen, por otra parte, secuencias infinitas que admiten una interpretación mucho más condescendiente:

abaabaabaabaaba···

puede leerse como:

aba aba aba aba ...

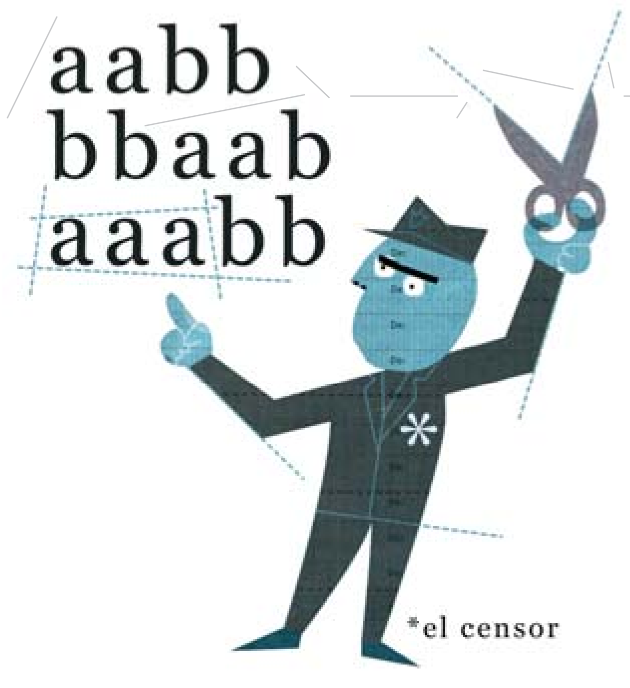
donde todas las palabras son permisibles. Notemos, sin embargo, que este último mensaje admite también un análisis según el cual todas las palabras estarían prohibidas:

$\underline{a}$ $\underline{baa}$ $\underline{baa}$ $\underline{baa}$ ...

Pero el hecho de que existan otras interpretaciones menos caritativas no le importa a nuestro censor, ya que él se encuentra dispuesto a aprovechar la menor excusa para no interceptar el mensaje.

En este contexto, Kolmogórov preguntó a los estudiantes si podían hallar una

secuencia infinita que *no* pudiese descomponerse en palabras siempre prohibidas o siempre permitidas. Si existiesen tales mensajes, cualquier división imaginable daría lugar a ambos tipos de palabras, lo cual pondría a nuestro censor en una posición bastante incómoda.



El estudiante aventajado

Según Shasha y Lazere, Kolmogórov contaba en la audiencia con un joven llamado Leonid Levin, que, años más tarde, llegaría a convertirse en una de las grandes figuras de la teoría de la complejidad. Uno de sus mayores logros consistió en aislar, de manera independiente a Stephen Cook, la noción de *problema NP-completo*, que constituye una de las clases de complejidad involucradas en el problema de si P = NP [*véase* «P = NP», por Agustín Rayo; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2010], uno de los problemas abiertos más importantes de la matemática contemporánea. Como un estudiante más, Levin encaró el problema propuesto por Kolmogórov y ofreció la siguiente respuesta:

Siempre es posible dividir una secuencia infinita de caracteres de manera que el resultado (excepto tal vez la palabra inicial) incluya únicamente palabras prohibidas o únicamente palabras permitidas.

El argumento de Levin exhibe una madurez inusual para un estudiante de secundaria. Definamos primero una secuencia infinita como *irreprochable* si, y solo si, cualquier segmento inicial posible constituye una palabra permisible. Si volvemos a nuestro ejemplo, cada uno de los mensajes siguientes serían irreprochables:

bbbbbbbbbb···
babababa···
bbabbabba···

Supongamos ahora que el censor intercepta una secuencia infinita *S*:

$$s_1 s_2 s_3 s_4 s_5 \cdots s_p s_{p+1} \cdots$$

donde cada s_p denota *a* o *b*. Si eliminamos un segmento inicial del mensaje, el resultado es una nueva secuencia infinita de caracteres. No es mucho lo que podemos dar por sentado acerca de las secuencias que obtendremos tras eliminar un segmento inicial. Quizás algunos cortes nos dejen con una secuencia irreprochable, pero puede que no: tal vez existan otros que den lugar a una secuencia reprochable, en cuyo caso debe haber al menos un segmento inicial de la nueva secuencia que constituya una palabra prohibida.

Preguntémonos lo siguiente acerca de la secuencia *S*: ¿existe algún número *n* tal que *cualquier corte* de tamaño mayor que *n* nos deje con una secuencia reprochable?

O bien existe tal número, o bien no. Razonemos por casos:

I. Supongamos que dicho número existe. Por tanto, cualquier corte de tamaño mayor que *n* nos dejará con una serie reprochable.

Demostremos que, en tal caso (y salvo quizá la palabra inicial), siempre podemos dividir la secuencia *S* en palabras prohibidas. El primer paso consistiría en hacer un corte de tamaño $n + 1$. Aunque desconocemos si los primeros $n + 1$ caracteres constituyen una palabra permisible o no, sabemos que la secuencia infinita restante es reprochable, lo que significa que al menos uno de sus segmentos iniciales es una palabra prohibida.

El siguiente paso consiste en suprimir una de esas palabras prohibidas. El resultado de este segundo corte ha de ser también una secuencia reprochable. ¿Por qué? Pues porque habíamos supuesto que todo corte de tamaño mayor que *n* en la serie original daba lugar a una serie reprochable. Si la palabra prohibida que hemos eliminado contaba con *k* caracteres, el segundo corte se corresponde con uno de tamaño $n + k > n$ sobre la secuencia inicial, que, por hipótesis, da lugar a una serie reprochable. Basta con repetir el mismo paso un número infinito de veces para completar la división de *S* en palabras prohibidas (salvo quizá la palabra inicial).

II. Supongamos ahora que *no* existe un número *n* tal que todo corte de tamaño mayor que *n* nos deje con una serie reprochable.

Veamos que ahora resulta posible dividir toda la secuencia *S* en palabras permisibles (excepto tal vez la primera). Para empezar, escojamos un corte inicial que nos deje con una secuencia infinita irreprochable. No sabemos si el segmento inicial suprimido constituye una palabra permisible o prohibida, pero sí sabemos que cualquier segmento inicial de la secuencia restante forma una palabra permisible.

El siguiente paso consiste en buscar un nuevo corte que nos deje con otra secuencia irreprochable. Notemos que este segundo corte no tiene por qué ser arbitrario, ya que nada nos garantiza que cualquier corte sobre una secuencia irreprochable genere una secuencia irreprochable. Volviendo a nuestro ejemplo, el resultado de omitir *b* en la siguiente secuencia irreprochable infinita:

bababababababa···

da lugar a una secuencia reprochable:

abababababab···

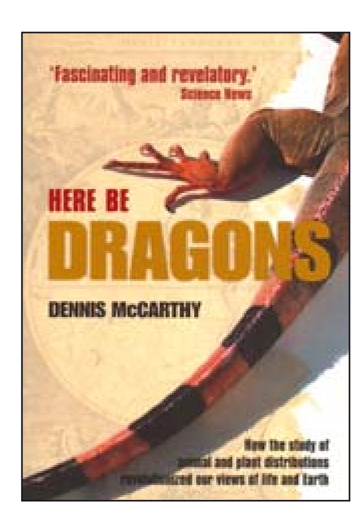
ya que *a* es una de las palabras prohibidas. Pero, aunque no nos valga con cualquier corte, de lo que sí podemos estar seguros es de que existe al menos uno que nos deja con una secuencia irreprochable: si no, contravendríamos el supuesto inicial, según el cual no existía ningún número *n* tal que todo corte de tamaño mayor que *n* diese como resultado una serie reprochable. Por tanto, si escogemos bien, obtendremos una división en una palabra permisible y una secuencia irreprochable. Basta con repetir el mismo paso un número infinito de veces para completar la división de *S* en palabras siempre permisibles (salvo quizá la primera).

Merece la pena subrayar que este razonamiento resulta válido con independencia del alfabeto escogido y de la división que hagamos entre palabras prohibidas y permitidas. El argumento de Levin es completamente general.

PARA SABER MÁS

D. Shasha y C. Lazere describen el episodio y la respuesta del joven Levin en **Out of their minds: The lives and discoveries of 15 great computer scientists**, Springer Verlag, 1998.

DANIEL UZQUIANO



HERE BE DRAGONS,
por Dennis McCarthy. Oxford University Press; Nueva York, 2011.

Biogeografía palpable

La fusión entre la evolución biológica y la tectónica de placas

En este libro, Dennis McCarthy hace un ameno repaso sobre algunos de los conceptos básicos de biogeografía. *Here Be Dragons* utiliza un lenguaje cercano y está repleto de casos que ayudan a comprender ciertos patrones de distribución de animales y plantas sobre el planeta. La evolución biológica no es ajena a los cambios geológicos que transforman continuamente la geografía terrestre. Es más, si nuestro planeta fuera un lugar homogéneo y estático, difícilmente habríamos llegado a contar con una biodiversidad tan grande como la que hemos llegado a conocer.

Tras leer este libro, uno adquiere mayor conciencia del poder resolutivo de la combinación de dos grandes teorías enunciadas en los últimos 150 años: la evolución biológica y la tectónica de placas. Los ocho capítulos en los que se divide esta obra comienzan con un repaso histórico. En los dos primeros se dilucidan las motivaciones que llevaron a Charles Darwin, Alfred Russell Wallace y Alfred Wegener a enunciar sus respectivas teorías sobre el dinamismo biológico y geológico. Los tres fueron intrépidos viajeros, observadores, inteligentes y, ante todo, tenaces. Y quizá fuera esta última, la tenacidad, la cualidad que les diferenció del resto de la comunidad científica, doblegando los paradigmas básicos del naturalismo que vigorosamente defendieron muchos de sus contemporáneos. Pero una vez dinamitadas las barreras ideológicas, la capacidad predictiva de sus correspondientes disciplinas se tradujo en un inimaginable impulso de las ciencias naturales, tanto a nivel cuantitativo como cualitativo. Es en este momento cuando la biogeografía se alzó como una perfecta fusión entre dos mundos en constante movimiento, el biológico y el geológico, que permitió analizar las causas y efectos de la interacción entre ambos.

Los capítulos centrales se dedican a recoger múltiples ejemplos que avalan la capacidad resolutiva de esta disciplina. El anecdotario incluye pinzones variopintos, elefantes menguantes, arañas voladoras, varanos gigantes, pingüinos emperador, musarañas hiperactivas, iguanas nadadoras, cangrejos albinos, aves corredoras, rayas de agua dulce, salamandras californianas, gusanos abisales, mesosaurios paleozoicos, mamíferos ovíparos, focas nerpa y parásitos monoespecíficos, entre otros. Todo tiene una lógica y una razón de ser a ojos de la biogeografía. Toda especie emparentada con otra comparte un ancestro común con una distribución original continua. Las barreras geográficas, bien sean océanos en expansión, elevaciones montañosas, profundidades abisales, o, a menor escala, la frondosidad de las selvas ecuatoriales, resultan en aislamientos poblacionales que propician los procesos de especiación.

¿Por qué osos polares y pingüinos emperadores no habitan un mismo lugar, pese a que ambos están adaptados a muy bajas temperaturas? ¿Por qué en Australia y Nueva Zelanda los marsupiales llegaron a ser los mamíferos dominantes, pero no fue así en América e incluso se extinguieron en todos los continentes del hemisferio norte? ¿Y por qué existen animales morfológicamente muy parecidos, pese a hallarse separados por una larga historia evolutiva y habitar zonas geográficamente muy alejadas? En este libro se exponen las respuestas a todas estas preguntas, siempre basadas en las intrincadas relaciones entre limitaciones fisiológicas, movilidad individual, adaptaciones específicas, movimientos litosféricos o relaciones ecológicas intra e interespecíficas, sin olvidar el inevitable componente azaroso que acompaña a todas ellas.

Pero la biogeografía, nos dice el autor, no solo sirve para explicar la distribución de los seres vivos en el planeta. Cuando se invierte el sentido de la inferencia, también informa de cambios geográficos importantes que no han dejado rastro geológico. Cordilleras, océanos y ríos cambian su configuración continuamente. Faunas y floras parecidas separadas por barreras físicas difícilmente franqueables son fehacientes indicaciones de que tales obstáculos no existieron en el pasado. Algunos cambios mayores a escala continental se intuyen por el rastro que dejan en la distribución de organismos de muy diversa índole.

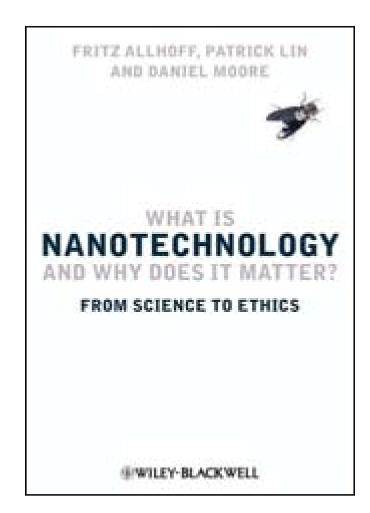
Sin abandonar la prueba empírica, el autor se guarda los casos más llamativos para los dos penúltimos capítulos. Cuando uno ahonda en el conocimiento de la naturaleza se da cuenta de un fenómeno ciertamente curioso: no se precisa de grandes barreras geográficas para promover el aislamiento reproductor de algunas poblaciones. El inicio de una divergencia evolutiva puede hallarse en el propio comportamiento de los individuos de una misma especie. McCarthy pone el ejemplo de las orcas, una de las formas etológicamente más complejas entre los mamíferos actuales. La división existente entre grupos de orcas se manifiesta en la dieta, las relaciones grupales, el aspecto físico externo e incluso en la reacción de otras especies frente a distintos ejemplares, perteneciendo todos sus individuos a un solo taxón. Tras leer las páginas que se refieren a este ejemplo, casi se puede llegar a pensar que no hay barrera más infranqueable que la falta de entendimiento entre miembros de una misma especie.

La guinda de esta obra llega en el penúltimo capítulo, que hace referencia a la evolución de la especie humana y su civilización desde el punto de vista biogeográfico. Nuestra propia diversidad, a nivel genotípico y fenotípico, y desarrollo tecnológico-cultural han seguido unos patrones geográficos que parecen alejarse de la aleatoriedad. En este capítulo es donde el autor se acerca más al ensayo, argumentando a posteriori que la configuración mundial actual y gran parte de nuestra trayectoria histórica no han sido un mero producto del azar. Cuestiones como el origen de la civilización occidental, el colonialismo, la fragmentación lingüística, el racismo y la diversidad cultural y biológica humana son analizadas desde el punto de vista biogeográfico. Independientemente del peso que cada uno quiera otorgarle a tales razones, el texto resulta ciertamente inspirador y anima al debate.

Para finalizar, el último capítulo sintetiza las ideas principales del libro. Asimismo, insiste en el hecho de que la biogeografía ayuda a explicar gran parte de

la configuración ecológica planetaria actual. Yendo al extremo, la esencia del libro queda resumida en una sola afirmación que aparece en este octavo capítulo: «Todo —y todo componente y característica de todo— tiene una historia evolutiva y un lugar de origen.» Quien lea esta obra con detenimiento aceptará la sutil invitación del autor a convertirse en biogeógrafo, intentando desentrañar el porqué de la configuración ecológica, tecnológica y social de cada lugar al que se desplace.

—Marc Furió
Instituto Catalán de Paleontología Miquel Crusafont



WHAT IS NANOTECHNOLOGY AND WHY DOES IT MATTER? FROM SCIENCE TO ETHICS,

por Fritz Allhoff, Patrick Lin y Daniel Moore. Wiley-Blackwell; Chichester, 2010.

Nano

Promesas y realidades

En teoría de la medición, el prefijo *nano* designa la milmillonésima parte de la unidad básica. Mil millones de nanosegundos componen un segundo. Por lo común, cuando se habla de nanotecnología nos movemos entre escalas de tamaño o longitud, no de tiempo. Recurrimos a los nanómetros (nm) cuando abordamos los átomos. Para que algo exista en nanoescala, por lo menos una de sus dimensiones (altura, anchura o profundidad) debe caer por debajo de los 100 nm. Añádase que la nanotecnología opera con materiales, estructuras, mecanismos y sistemas que tienen unas propiedades únicas en razón de su tamaño mínimo. Para tener una idea intuitiva de esas proporciones de nanoescala, suele recurrirse a comparaciones: el nanómetro comparado con el metro viene a ser como una pelota de golf comparada con el tamaño de la Tierra. Se emplea también el rango de escalas: una hormiga es el del orden de 5 milímetros; la cabeza de un alfiler, de 1 o 2 milímetros; el diámetro de un cabello humano, de 100 micrómetros; los hematíes, de unos 8 micrómetros de diámetro; la ATP sintetasa, de unos 10 nm de diámetro, o la anchura de la doble hélice de ADN, de unos 2 nm.

En la fundamentación de la nanotecnia convergen los avances de la química, la ciencia de materiales, la física de la materia condensada y la física del estado sólido. Aunque la nanoescala no constituye ninguna novedad, sí lo es una investigación revolucionaria en ese ámbito. Suele retrotraerse su origen a la conferencia dictada por Richard Feynman en el Instituto de Tecnología de California en diciembre de 1959, bajo el epígrafe «There's Plenty of Room at the Bottom». Apuntaba los principios de miniaturización y precisión de nivel atómico, que no violaban ninguna ley conocida de la física. El término *nanoescala* lo introdujo en 1974 Norio Taniguchi en un artículo pionero, «On the Basic Concept of Nano-Technology», donde indicaba que esta se ocupaba del comportamiento de los materiales a escala nanométrica.

El descubrimiento de materiales novedosos a nanoescala comenzó con el buckminsterfullereno, las célebres «buckybolas» que deben su nombre a la semejanza que entrañan con los domos geodésicos que el arquitecto Richard Buckminster Fuller popularizó. Halladas en 1985 en la Universidad Rice, constan de 60 átomos de carbono. En 1987, K. Eric Drexler publicó *Engines of creation: The coming era of nanotechnology*, que ponía al alcance de muchos las posibilidades de la nueva forma de tecnología basada en ensambladores moleculares, capaces de colocar átomos en conformaciones deseadas y así crear productos novedosos; la naturaleza nos precedía con las máquinas biológicas de nuestro organismo. Desde entonces, y a un ritmo creciente, han venido apareciendo sorprendentes materiales de nanoescala. Al propio tiempo se desarrollaron instrumentos para manipular átomos individuales, como el microscopio de sonda en IBM; en cierta imagen muy famosa, los investigadores de IBM movieron átomos de xenón alrededor de un substrato de níquel con un microscopio de efecto túnel. Dotados de capacidad para observar átomos uno a uno y su disposición en los materiales, los científicos comenzaron a estudiar materiales y dispositivos precisos desarrollados átomo a átomo. En 1991, Sumio Iijima, de NEC, daba a conocer nanotubos de carbono. La nanotécnica se ha convertido en la esperanza blanca de la técnica del futuro.

De las interacciones de nanoescala se ocupa la nanociencia. Aunque se conocen muchas de las leyes de la física que operan en ese nivel, la ciencia bracea con dificultad en un terreno donde la interrelación entre muchos átomos (más de dos) de los materiales de nanoescala pueden dificultar la predicción del resultado final. El tamaño exiguo de los materiales y la cercanía de las interacciones pueden determinar que fuerzas perfectamente conocidas a gran escala (rozamiento) y poderosas a esas escalas (gravedad) se tornen misteriosas o más livianas en el nivel de nanoescala.

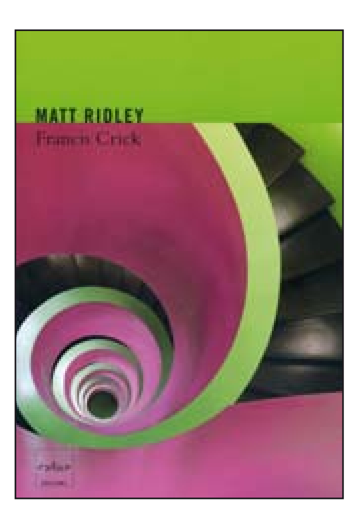
Otro aspecto muy importante de la nanociencia es la comprensión de la formación de materiales y mecanismos de nanoescala. A partir de una escala atómica y, controlando la situación y disposición atómico-molecular, vamos construyendo dispositivos, materiales y estructuras únicas. Se requieren para ello nuevos tipos de síntesis, que demandan, a su vez, una nueva comprensión de la formación de materiales a nanoescala. La incorporación de nuevos materiales a través de la historia ha definido la tecnología del período. Hablamos de la Edad de Piedra o de la Edad de Hierro, porque tales eran los materiales empleados en la técnica del momento. La Edad de Bronce cubre una fase de desarrollo de la civilización en que la metalurgia más extendida consistía en la técnica de fundir cobre y estaño para obtener bronce. Vivimos en la Era de Silicio, si consideramos su aplicación y la de otros semiconductores en la industria de la computación.

A nanoescala, material, aparato y estructura se confunden. Los nanomateriales se han asentado en el campo de los materiales desde hace años para potenciar sus propiedades. Por botón de muestra, se han empleado partículas de car-

bono en los neumáticos. Y se ha desarrollado el endurecimiento de los materiales por precipitación. El endurecimiento por precipitación es una técnica del tratamiento del calor que se aplica para reforzar los metales. Se apoya en la producción de nanopartículas finas e impuras que impiden el avance de los defectos en el interior del material. Puesto que esos defectos son la causa dominante de la plasticidad, el tratamiento endurece el material. Sépase, además, que los sistemas modernos de modelización de mecanismos, materiales e interacciones de nanoescala se apoyan en el átomo como su unidad fundamental.

A propósito de la repercusión de la nanotecnología, en el mundo de la computación, por ejemplo, se adivina el desarrollo de aparatos cuyos circuitos de computación están dotados de mejores propiedades, con una densidad mayor de circuitería y nuevas arquitecturas. Una computación más pequeña y más poderosa permite el desarrollo de máquinas de nanoescala (nanobots), autónomas o de control externo. Con esas máquinas podríamos introducirnos en lugares donde jamás soñaríamos poder hacerlo (en el torrente circulatorio, en el interior celular o en medios tóxicos). No menos prometedores son los nanobots en medicina. Sin olvidar el controvertido problema de la neuropotenciación con implantes cerebrales.

—Luis Alonso



FRANCIS CRICK. LO SCOPRITORE DEL CODICE GENETICO,

por Matt Ridley. Codice Edizioni; Turín, 2010.

Francis Crick

La mitad más anciana de la doble hélice

Para el público de hoy, los nombres de Watson y Crick son inseparables. Watson-y-Crick, un símbolo, un objeto cultural como la doble hélice cuya estructura revelaron en 1953. Sus perfiles individuales han desaparecido, borrados por el descubrimiento y el desarrollo de la biología molecular, mientras que sus nombres se encuentran ya en el restringido templo de las personas que han dado forma a nuestra idea de la vida. Pero reducir la molécula de ADN a la vida de estos dos científicos es decididamente limitativo, sobre todo para Francis Harry Compton Crick, la mitad más anciana de la doble hélice.

En 1953, cuando en el laboratorio Cavendish de Cambridge se lanzó por primera vez la hipótesis de la estructura correcta del ácido desoxirribonucleico, Crick estaba a punto de cumplir 47 años. A partir de entonces, su vida cambiaría radicalmente. La reconstrucción de la vida de Crick que propone Ridley dedica mucho espacio a todo lo que ocurrió en Cambridge y alrededores en la «carrera loca» hacia la estructura del ADN, a principios de la década de los cincuenta del siglo XX. Fue una vuelta de tuerca para Crick, que hasta entonces era considerado poco más que un buen científico, con tendencia a la logorrea y nada modesto: no precisamente un genio.

Después de la doble hélice, y mucho tiempo después del premio Nobel, se produjo un cambio radical. Crick dominaba el nuevo mundo de la biología molecular y su reputación le permitía colaborar con las mejores mentes científicas de la época. Contribuyó decisivamente a una de las más importantes empresas post-doble hélice: el desciframiento del código genético (las reglas que unen los tripletes de bases de los nucleótidos del ADN con los correspondientes aminoácidos). También se debe a Crick la formulación de uno de los principios más influyentes de la disciplina que contribuyó a fundar, el «dogma central de la biología molecular», que afirma que la información fluye solo desde el ADN hacia el ARN y las proteínas, nunca en sentido contrario.

Como todo dogma, esa proposición provocó muchas críticas, algunas con fundamento. Pero ha tenido una importancia fundamental para la historia de las ciencias de la vida del siglo XX, al guiar la investigación de los mecanismos finos de los fenómenos orgánicos. Tras su contribución al descubrimiento del «secreto de la vida», Crick se dedicó a otros temas: primero al origen de la vida en la Tierra —con poca fortuna— y luego a la conciencia. En esto y en la puesta a punto de nuevos métodos de trabajo para descubrir los fundamentos biológicos del pensamiento humano seguía trabajando cuando murió en 2004 en La Jolla (California), donde se hallaba establecido desde hacía varias décadas.

Siempre en equilibrio entre biografía y divulgación, Ridley traza un perfil exhaustivo de Crick, cuya personalidad, que solo de vez en cuando emergía en las publicaciones científicas, cuenta con todo detalle. Se perfila sobre todo el fin último que animó la investigación de Crick: enterrar el vitalismo, la idea de que no es posible explicar lo vivo sin recurrir a principios irreducibles de la química y la física. Una confianza intransigente en la ciencia que caracterizó el comportamiento de Crick, que rechazó los honores ofrecidos por la reina británica (porque no se basaban en el mérito, sino en sistemas irracionales de jerarquía nobiliaria) y que polemizó con la iglesia (especialmente con el cristianismo).

La confianza en la ciencia (y en los científicos) le atrajo también duras críticas, sobre todo cuando se convirtió en el apoyo teórico de políticas de control de nacimiento y de las ideas sobre la inferioridad intelectual de los negros respecto a los blancos. Entonces se dio cuenta de que fuera del laboratorio debía ser más cauteloso de lo que era en los debates científicos, donde acostumbraba a rebatir de manera feroz cualquier hipótesis que considerase equivocada: una costumbre que le restaba popularidad entre los colegas que no llegaban a conocerlo a fondo. El protagonista de este libro es un personaje simpático, alegre y a menudo arrogante, características que hacen del ensayo de Ridley —en algunos momentos hagiográfico y con tendencia al chismorreo— una obra divertida y apasionante.

—Mauro Capocci



EL POBLAMIENTO RURAL DE DIANIUM, LUCENTUM, ILICI Y LA CIUDAD ROMANA DE VILA JOIOSA (SIGLOS II A.C.-VII D.C.). BASES PARA SU ESTUDIO,

por Carolina Frías Castillejo. Publicaciones de la Universidad de Alicante; ciudad, 2010.

Un nuevo modelo de análisis histórico

El territorio de las ciudades romanas

La obra representa el enorme esfuerzo de ofrecer una síntesis histórica de muchas decenas de publicaciones de carácter distinto (estudios epigráficos, numismáticos, arqueológicos y síntesis históricas sobre aspectos parciales), valorando cada una de ellas y buscando la coherencia entre investigaciones parciales tan diversas. Este tipo de estudios está representando una nueva línea en la investigación histórica, que hasta la fecha ha estado más centrada en el estudio de los grandes núcleos de población, ciudades romanas con importantes restos arqueológicos.

Cuando el naturalista Plinio, al recoger información de la descripción del mundo romano llevada a cabo por Agripa a comienzos del imperio, hablaba de las *civitates*/ciudades romanas de Hispania, daba la cifra de 399 ciudades. A mediados del s. II d.C., el geógrafo Ptolomeo enumeraba 417 *póleis*/*civitates*/ciudades para el mismo ámbito territorial. Teniendo en cuenta algunos pasajes de dudosa interpretación de la obra de Ptolomeo, la cifra podría ascender a las 420 *póleis*/*civitates*/ciudades para todo el ámbito de la península Ibérica más las islas Baleares. Casando ambas informaciones con los nuevos datos de la documentación epigráfica, donde aparecen nuevas ciudades no mencionadas ni por Plinio ni por Ptolomeo, sabemos que la cifra total pudo alcanzar en el período altoimperial las 450 *póleis*/*civitates*/ciudades. Aunque descontemos amplios espacios del territorio hispano que quedaron como monopolio del Estado (canteras, minas, vías públicas, salinas, grandes extensiones de pinares...), se impone la evidencia de que el territorio de las ciudades romanas de Hispania era muy grande. Ello no puede separarse de la atención al volumen de población total, que podía situarse entre los 5 y 6 millones de personas.

En el marco de esa consideración, adquiere doble valor el esfuerzo realizado por Carolina Frías para no solo situar en un contexto geográfico preciso las cabeceras de las ciudades sino todos los núcleos urbanos rurales del territorio de las mismas. Por lo mismo, debe resaltarse el valor del capítulo II, «Aspectos metodológicos», donde analiza la historia de la investigación, la organización del territorio y la definición arqueológica de los asentamientos rurales para justificar la propuesta de una metodología. Al hablar de la «organización del territorio» distingue entre *vici, villae* y asentamientos campesinos. Desde estos presupuestos, va analizando el núcleo urbano central y los núcleos urbanos del territorio, dedicando un capítulo a cada una de las ciudades mencionadas en el título de la obra. Y para apoyar sus afirmaciones, introduce un apartado con el «Catálogo de los yacimientos» al final del estudio de cada una de las ciudades.

No considero culpa de la autora, sino del colectivo de historiadores, el que no se haya dado más importancia al término latino *casa* para clasificar como tal muchos asentamientos rurales. En la toponimia actual quedan numerosos ejemplos de topónimos como casa e incluso como casa romana en medios rurales y en contextos que incluso presentan materiales arqueológicos romanos. Probablemente, algunos de los yacimientos presentados como *villae* en esta y en otras obras equivalen a *casae*, pues hubo casas rurales romanas con un gran complejo constructivo. Mientras que una *casa* rural romana podía incluir a una familia ampliada junto a trabajadores contratados y mano de obra esclava, una *villa* romana solía contar con un volumen de población mayor y presentar una mayor diversificación en sus actividades económicas.

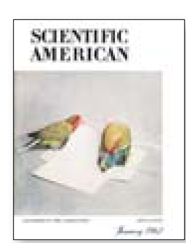
La autora ha realizado con profundidad el análisis de las condiciones particulares de cada núcleo urbano del territorio (tipo de suelo, régimen de lluvias, relación con vías de comunicación, llanura o pendiente, proximidad a cuencas fluviales...). Con tales datos, más los del apoyo de los restos arqueológicos (restos de prensas de aceite o de vino), reconstruye las posibilidades económicas de cada núcleo urbano. Tal vez haya que resaltar más el valor de las explotaciones salineras en alguno de ellos, ya que, si algunos obtenían sal para la conserva del pescado, estaban también en condiciones de comercializar con la sal, uno de los productos de mayor entidad en la Antigüedad, si tenemos en cuenta que el consumo anual oscilaba entre los 28 y los 30 kilogramos por persona y año; en otros términos, que una familia media podía necesitar unos 120 kilogramos de sal al año (consumo personal, conservación de carnes y verduras, necesidades para animales y para usos médicos...).

Otro de los méritos de la obra, apoyada en múltiples mapas, gráficos y fotografías, reside en haber buscado y justificado las claves del abandono, de la transformación o de la larga pervivencia de cada núcleo urbano, sometido a los cambios económicos del entorno o bien a cambios producidos por factores externos. Así, resalta bien la incidencia negativa que tuvo la mejora del puerto de *Carthago Nova* (Cartagena) al contribuir a frenar el desarrollo de *Ilici*, *Lucentum* y La Vila Joyosa, ciudades que se vieron también afectadas por la necesidad de reducir la producción de aceite y de vino. Mientras la época final de la República y los dos primeros siglos del Imperio fueron económicamente buenos para las ciudades estudiadas, la autora resalta con buenos argumentos que esas ciudades, incluido su núcleo urbano central, sufrieron la larga crisis de los siglos III y IV d.C. Además del cambio de comportamiento de las oligarquías locales, que comenzaron a desentenderse de sus compromisos tradicionales de evergetismo, muchas de las ciudades costeras sufrieron también las consecuencias de un abandono o de una gran reducción de las actividades pesqueras, que tantos beneficios les habían procurado.

Nos hallamos, pues, ante una obra bien construida, que puede servir de modelo para el estudio de la ciudad y de su territorio en otros ámbitos de la Hispania romana.

—Julio Mangas
Universidad Complutense de Madrid

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Enero 1962

El genio nuclear

«A la vez que las potencias nucleares retomaban su punto muerto en la conferencia de Ginebra sobre prohibición de pruebas, la mayoría de los países del mundo maniobraban para mantenerse libres de la pesadilla nuclear. A través de Naciones Unidas, esos países aprobaron a buen ritmo una serie de resoluciones antinucleares. La Asamblea General, con 70 votos a favor y 21 en contra, decidió primero pedir a todas las potencias que detuvieran de forma inmediata y permanente los ensayos nucleares. En contra de la medida votaron las potencias nucleares (EE.UU., el Reino Unido, Francia y la URSS), que además declararon no sentirse obligados por esa resolución.»

Estampidos sónicos

«El año pasado el Congreso de EE.UU. asignó 11 millones de dólares a la Agencia Federal de Aviación para iniciar el desarrollo de un prototipo de avión de transporte supersónico, con la ayuda técnica de la NASA. Entre las grandes cuestiones de diseño, construcción y operatividad pendientes de resolver antes de que los aviones comerciales superen la velocidad del sonido, una de las más difíciles es el problema del estampido sónico, los sonidos explosivos que se generan cuando un objeto de mueve por el aire a una velocidad supersónica. Los estampidos sónicos creados por reactores militares al volar sobre zonas poco pobladas ya han producido sustos y daños; es obvio que no debe permitirse que una nueva flota de transportes supersónicos lancen esos estruendos cuando, al evolucionar en las proximidades de los aeropuertos metropolitanos, vuelan a escasa altura sobre las ciudades.»



Enero 1912

La industria aeronáutica

«Entre el 16 de diciembre y el 2 de enero se celebró en París el tercer Salón Internacional de la Aviación. Es de notar que, en comparación con las exhibiciones de años anteriores, el conjunto de modelos presentados era, en mayor o menor grado, de índole internacional. Además de unos importantes cambios estructurales, se han introducido mejoras atendiendo al confort de pilotos y pasajeros; y teniendo presente en primer lugar el "taxi" Deutsch, pronto se pedirá a los carroceros que construyan fuselajes de avión cerrados, tal como hacen con las carrocerías de automóvil.»

Soluciones en hormigón

«Dada la ventaja que supone su baratura, el señor Thomas A. Edison ha concebido la idea de fabricar muebles de hormigón. Ya ha construido una pieza de muestra, un armario que cuesta solo 10 dólares. El señor Edison aclara que ese no será el precio de venta, y que no se aventura a dar un precio en almacén, porque no tiene idea de a cuánto puede ascender la parte del intermediario sobre los beneficios. Al objeto de comprobar la capacidad del mueble para aguantar la rudeza de su manipulación por los transportistas, recientemente lo envió de ida y vuelta a Chicago.»

Enero 1862

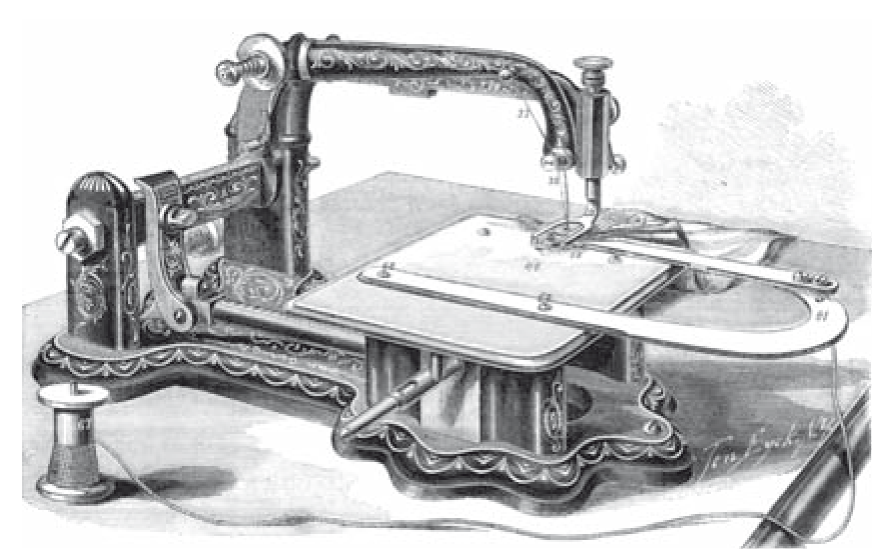
Máquinas de coser

«En la ilustración se muestran algunas importantes mejoras que se han introducido en la máquina de coser Wheeler y Wilson. Aunque el innovador funcionamiento de la máquina no ha variado desde su primera presentación al público, hace ya casi diez años, de vez en cuando se le han ido añadiendo accesorios de gran utilidad. Uno de los recientes consiste en un sencillo dispositivo para colocar cordón en la pechera de las camisas y en los cuellos, en los chalecos o abrigos de caballero, o en los trajes de señora.»

Wheeler y Wilson era en la época uno de los mayores fabricantes de máquinas de coser en EE.UU. En 1907, Singer se haría con todas sus actividades manufactureras y comerciales.

Noble chimenea, despreciables hornos

«Cuán vívidamente nos acude a la mente la imagen de aquellas espaciosas cocinas de antaño. En ellas, la suprema gloria era el hogar tradicional con sus brasas encendidas, grandes leños y morillos de hierro. Proyectaba su esplendor sobre toda la estancia y su brillante luz bañaba de oro el sencillo y casero mobiliario. ¡Qué puro era el aire aquellos días! La enorme chimenea, con su vigoroso tiro, arrastraba al exterior las impurezas de la atmósfera, y dejaba un aire limpio, vivificante y sano. Hoy, nos agachamos repetidamente ante unos hornos de cocinar calientes y nos extraña sentirnos tan atontados y adormilados por las tardes; o nos apiñamos alrededor de unas estufas herméticas y nos asombra que el aire parezca enrarecido y contaminado.»



Una nueva máquina de coser de Wheeler y Wilson, la primera marca de una industria floreciente, 1862.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. VI, N.º 1; 4 DE ENERO DE 1862




INNOVACIÓN

Ideas que cambian el mundo

VV.AA.

Diez nuevas técnicas que podrían resultar revolucionarias.



COMPORTAMIENTO ANIMAL

Las hormigas y el arte de la guerra

Mark W. Moffett

Las batallas entre hormigas guardan una sorprendente semejanza con las operaciones militares de los humanos.

NEUROCIENCIA

Interruptores ocultos en la mente

Eric J. Nestler

Mediante cambios epigenéticos que encienden y apagan genes, la experiencia puede influir en las enfermedades mentales.



EXPLORACIÓN ESPACIAL

Rumbo a Marte

Damon Landau y Nathan J. Strange

La adaptación de técnicas usadas en los robots de exploración planetaria permitiría reducir los costes y la duración de las misiones tripuladas al planeta rojo.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, George Musser, Gary Stix, Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Davide Castelvecchi, Graham P. Collins, Deborah Franklin, Maryn McKenna, John Rennie, Sarah Simpson
ART DIRECTOR, INFORMATION GRAPHICS Jen Christiansen
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND PUBLISHER Bruce Brandfon
MANAGING DIRECTOR, CONSUMER MARKETING Christian Dorbandt

DISTRIBUCIÓN

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 euros	100,00 euros
Dos años	120,00 euros	190,00 euros

Ejemplares sueltos: 6,00 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Carlos Lorenzo: *Los primeros americanos*; Fabio Teixidó: *Buscando vida en Marte* y *De cerca*; Luis Bou: *Alimentación sostenible* y *Apuntes*; Juan Manuel González Mañas: *El gen destructor*; Alberto Ramos: *La percolación, un juego de mosaicos aleatorios*; José M. Vidal Donet: *Virus gigantes*; J. Vilardell: *Los inconvenientes de la fracturación hidráulica* y *Hace...*Joandomènec Ros: *Tiranosaurios diminutos*; Bruno Moreno: *Apuntes*; Alfredo Marcos: *Filosofía de la ciencia*; Mercè Piqueras: *Libros*; J. Vilardell: *Curiosidades de la física* y *Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España